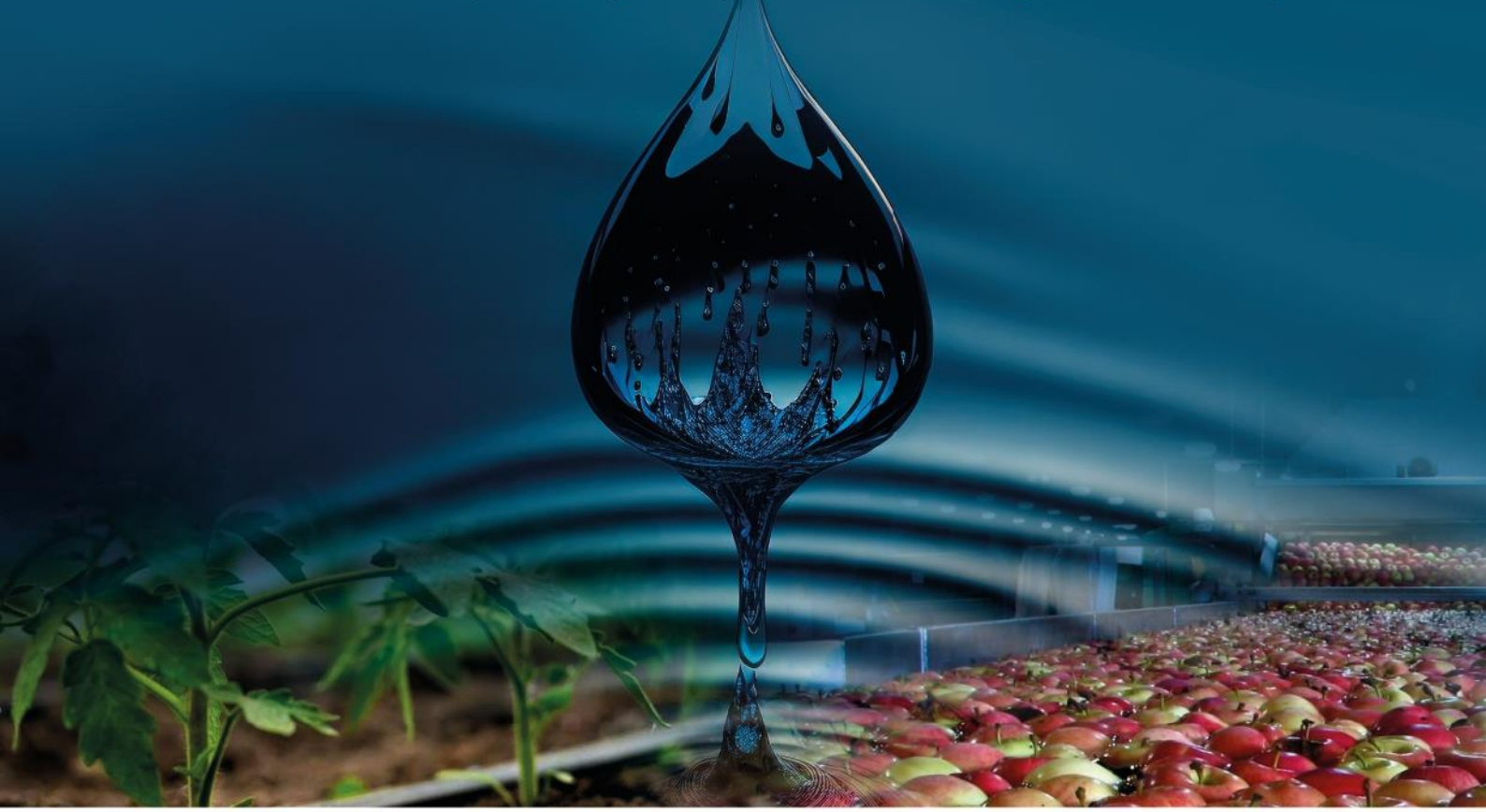
Sostenibilidad hídrica en horticultura y poscosecha

Riego, fertirrigación, tratamientos fitosanitarios, material vegetal, acondicionamiento y procesado de frutas y hortalizas

Eds. Claudia Conesa, Luis Bonet, Evangelina Medrano, Juan Gabriel Pérez, Pere Papasseit, Leandro M. Olmos y Alicia Namesny



AGROTEXTILES & TECHTEXTILES ARRIGONI 1936
cajamar CAJA RURAL
citrosol stay fresh with innovation
CID Bio-Science Tools that work where you work.
Copersa
IOLAND
JOHN DEERE
KEPWATER ENGINEERING
MASSÓ AGRO DEPARTMENT
Regaber matholding group
SmartWashSolutions Pinpoint Process Control.
WaterTech refreshing agrofood
TORO
Green Legacy
WiseConn

www.bibliotecahorticultura.com

Sostenibilidad hídrica en horticultura y poscosecha

Riego, fertirrigación, tratamientos fitosanitarios, material vegetal, acondicionamiento y procesado de frutas y hortalizas

Eds. Claudia Conesa, Luis Bonet, Evangelina Medrano, Juan Gabriel Pérez, Pere Papasseit, Leandro M. Olmos y Alicia Namesny

www.bibliotecahorticultura.com

SPE3

Sostenibilidad hídrica en horticultura y poscosecha

Riego, fertirrigación, tratamientos fitosanitarios, material vegetal, acondicionamiento y procesado de frutas y hortalizas

Eds. Claudia Conesa, Luis Bonet, Evangelina Medrano, Juan Gabriel Pérez, Pere Papasseit, Leandro M. Olmos y Alicia Namesny

www.bibliotecahorticultura.com

© Sostenibilidad hídrica en horticultura y poscosecha
Riego, fertirrigación, tratamientos fitosanitarios, material vegetal, acondicionamiento y procesado de frutas y hortalizas
Octubre, 2024
© SPE3, s.l., Valencia, España

Editores:
© Claudia Conesa, Luis Bonet, Evangelina Medrano, Juan Gabriel Pérez, Pere Papasseit, Leandro M. Olmos y Alicia Namesny

Realización y Diseño:
Rubén Planas

Producción, distribución y copyright:
SPE3 - Especialistes en Serveis per a la Producció Editorial, s.l.

ISBN: 978-84-16909-53-7

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Doctor Manuel Candela 26, 11ª
46021 Valencia – España
Tel.: +34-649 48 56 77 / info@poscosecha.com
NIF: B-43458744

www.poscosecha.com
www.postharvest.biz
www.bibliotecahorticultura.com
www.tecnologiahorticola.com
www.actualfruveg.com

La realización de este libro ha sido posible gracias a la colaboración de los autores de cada uno de los capítulos y a las empresas patrocinadoras

PRÓLOGO

El agua es uno de los recursos finitos, más importantes sometido a una presión cada vez más intensa. Es fuente de vida y origen de la gran mayoría de los alimentos, que son esenciales para que el ser humano pueda alimentarse y desempeñar con energías el resto de sus actividades.

Tenemos cada vez menos agua, debido a los efectos del cambio climático, con periodos de sequía cada vez más largos e intensos. Y, al mismo tiempo, la población mundial no para de crecer, con lo que esto supone de mayor necesidad de alimentos y, por lo tanto, un incremento en las necesidades de agua.

Este panorama, bien conocido desde hace ya muchos años por todos aquellos que vivimos y cuidamos del campo, nos ha llevado a encabezar, con responsabilidad y con medidas concretas, un proceso diseñado con un doble objetivo: disminuir la demanda de agua al mismo tiempo que conseguimos producir más para seguir alimentando a una población creciente.

Sostenibilidad, ahorro y modernización han ido de la mano en un esfuerzo sostenido que se ha traducido en la disminución de un 25% en el volumen de agua utilizado por los regadíos en España. Ha sido un camino que iniciamos con el nuevo siglo XXI con fuerza y en el que hemos llevado a cabo una inversión en modernización de los sistemas de riego que ha ascendido a más de 5.000 millones de euros, sumando la financiación tanto pública como privada.

Es un proceso continuo de mejora que no se detiene aquí. El nuevo plan para la modernización de regadíos que ya está en marcha permitirá movilizar en el periodo 2022-2027 una inversión público-privada superior a los 2.400 millones de euros. Es un presupuesto que proviene de diferentes fuentes de financiación públicas, como el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), los fondos europeos FEADER, los de las Comunidades Autónomas y las aportaciones privadas de las propias Comunidades de Regantes españolas.

Es, sin duda, la inversión más cuantiosa en regadíos desde que vivimos en democracia. El impacto será espectacular. El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) ha calculado que estas inversiones permitirán conseguir un ahorro de agua mínimo del 10 % respecto a la situación de partida que ya tenemos.

Este esfuerzo se dirige a una primera modernización en infraestructuras de 100.000 Has y a una segunda modernización de 700.000 Has con la incorporación y desarrollo de las nuevas tecnologías para mejorar las infraestructuras y su gestión. La suma de todo nos ayudará a medir con más precisión el consumo de agua y a manejar todas las variables como la humedad o el clima para ser más eficientes.

Conscientes de que tenemos que aprovechar las oportunidades, hemos participado en la primera convocatoria del PERTE de digitalización del ciclo del agua para regadío.

La digitalización y el telecontrol en las Comunidades de Regantes son herramientas imprescindibles para gestionar con eficiencia el agua, la energía, los fertilizantes y el resto de inputs que garantizan la producción de alimentos. En menos tierra, con menos agua y con menos costes, tenemos que producir más y mejor.

Horticultura y poscosecha

La tecnología en la agricultura es una vieja herramienta. Estamos muy familiarizados con ella y la sabemos aplicar con rigor y resultados en todos y cada una de las diferentes áreas en las que interviene primero el agricultor y luego nuestra industria agroalimentaria.

En el caso de la horticultura, contamos con sistemas de riego por goteo y por aspersión. Con estas tecnologías se puede programar la cantidad exacta de agua que requieren los cultivos, lograr un ahorro de agua hasta el 30% y aumentar hasta un 15% el rendimiento de los cultivos. La rotación de cultivos contribuye a obtener hortalizas más sanas que requieren menos cantidad de fertilizantes y nutrientes externos y menos agua para su crecimiento.

En la poscosecha hemos hecho avances significativos para sacar el máximo rendimiento a un uso eficiente del agua y a reducir sus pérdidas en este proceso. Entre las soluciones que se han puesto en marcha hay que destacar el almacenamiento de agua procedente de la lluvia, disminuyendo la utilización de aguas subterráneas o superficiales. Un complemento a esta solución es tener no solo un correcto sistema de almacenamiento, sino también del transporte de agua, para evitar pérdidas.

Otros recursos para ahorrar agua son el riego por goteo o la microirrigación; el tratamiento y la reutilización de las aguas residuales de las operaciones poscosecha, útil asimismo en la prevención de la contaminación del agua por los vertidos agrícolas, la monitorización regular del uso y calidad del agua en estas actividades o la utilización de material acolchado biodegradable en el suelo, que en algunos estudios han conseguido un 12% de reducción de agua al aumentar la humedad.

En definitiva, nos enfrentamos a desafíos y retos que nos estimulan para seguir avanzando por esta senda. Vamos a continuar dando pasos en el ahorro de agua mediante la modernización de los regadíos con un modelo de agricultura sostenible y unos principios fundamentales: competitividad, autosuficiencia económica y respeto hacia el medio ambiente. Solo así conseguiremos la rentabilidad económica, social, medioambiental y territorial a la que aspiramos.

Solo así conseguiremos dejar un mundo mejor a nuestros hijos y a las siguientes generaciones.

Juan Valero de Palma

Presidente de la Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España, Fenacore

¡Gracias! a autores, empresas y lectores

Los problemas del agua no son nuevos en la agricultura especialmente la que se localiza en la parte sudoriental de la Península. Sus agricultores coexisten con este problema desde hace décadas y de hecho España es uno de los sitios donde los riegos de bajo volumen (goteo, etc.) están más implantados, donde existen más desaladoras, etc.

Sin embargo, las irregularidades en las precipitaciones aumentan lo que ha llevado desde situaciones como pantanos prácticamente secos, a las inundaciones que experimentan en estos días en el norte de Europa por desbordamiento de ríos como el Danubio. Se pasa de sequías a excesos de difícil manejo.

La inauguración del año académico de la Universidad de Wageningen, WUR, tuvo el agua también como centro de su atención. Una de las expertas de esta institución[1], caracterizada por su importante vocación internacional, habló sobre los crecientes riesgos que rodean la compleja interacción entre el agua y la producción de alimentos en Asia, buscando obtener información sobre las intrincadas conexiones entre la disponibilidad de agua y la producción de alimentos en las cuencas fluviales. Otra experta alertó de la necesidad de prepararse de inmediato para futuros extremos hídricos y de las dificultades para los gobiernos que significa el largo plazo.

El uso del agua forma parte del LCA, life cycle assessment, evaluación del ciclo de vida, un requisito más en la búsqueda de la sostenibilidad de los sistemas de producción. En el congreso sobre el tema LCA2024, Barcelona, septiembre 2024, fue uno de los temas considerados a través de diferentes ponencias. Fue uno de los factores mencionados por Louise Fresco, presidenta de WUR hasta 2022, en su intervención en el coloquio de este encuentro científico como determinante del futuro.

Este libro recorre, desde su prólogo, a cargo de Fenacore, la Federación Nacional de Comunidades de Regantes de España y sus capítulos, la relación del agua con la agricultura, la desertificación y la compatibilización medioambiental, así como la tecnología y conocimientos existentes para regar minimizando el consumo de agua y aprovechando recursos hídricos no convencionales, tanto en cultivo al aire libre como protegido.

Se explican las particularidades de algunos cultivos principales, y las posibilidades que brindan los portainjertos a la hora de tener disponibles volúmenes escasos de agua y en general con salinidades altas. Otras prácticas de manejo también conllevan la utilización de agua, como la aplicación de fitosanitarios, un campo en que se han hecho importantes avances para minimizar el uso de este recurso.

Otro gran aspecto en el uso del agua es el procesado de frutas y hortalizas; manejar volúmenes escasos acrecienta la necesidad de cuidar los aspectos sanitarios y de reutilización.

---

[1] El agua es el centro de la apertura del curso académico en la Universidad de Wageningen. https://www.tecnologiahorticola.com/agua-curso-wageningen/

Numerosos proyectos trabajan para aumentar la sostenibilidad del sector agrícola teniendo el agua como centro. Un apartado está dedicado a los Proyectos que nos han hecho llegar sus investigadores.

Los autores de cada uno de los capítulos son expertos en sus respectivas áreas y nos consta el tiempo que han tenido que dedicar para poder elaborar sus capítulos. De todos ellos hemos recibido un gran apoyo a través de su entusiasmo y la calidad de los capítulos. Nuestro agradecimiento a cada uno de ellos, autores y coautores.

De los expertos en riego del IVIA, Luis Bonet y Juan Gabriel Pérez, a quienes llegamos de la mano de Ángeles Calatayud, también de esa institución, hemos tenido las primeras e importantísimas colaboraciones, aconsejándonos sobre los contenidos y poniéndonos en contacto con colegas de otras instituciones que han hecho posible la calidad de este libro. Igual agradecimiento a Evangelina Medrano, que cumplió una función similar en relación al IFAPA.

Los anunciantes que participan cumplen por un lado la función de hacer económicamente posible la publicación y la divulgación, y otra igualmente importante, especialmente para los lectores, como es complementar, con su información la de los capítulos del libro. Las empresas son quienes ofrecen los equipos y tecnologías necesarias para llevar a la práctica los conocimientos técnicos. ¡Muchas gracias! por enriquecer el libro con su oferta.

La presentación del libro se hace en la feria Fruit Attraction, en el stand de la Fundación Cajamar. Su Plataforma Terra, lleva a cabo una fantástica labor de divulgación de conocimientos para el sector agro, a través de publicaciones, foros, etc., y los "Proyectos Agua" de Cajamar Innova. ¡Muchas gracias! por la generosidad de patrocinar el libro y cedernos un espacio para su presentación.

A los lectores, que pueden descargar libremente "Sostenibilidad hídrica en horticultura y poscosecha" desde Biblioteca de Horticultura o menciones en nuestros portales Tecnología Hortícola, Poscosecha y ACTUAL FruVeg, esperamos que lo disfruten y que encuentren las respuestas que los han llevado hasta él.

Los editores de SPE3

Claudia Conesa
Leandro Olmos
Alicia Namesny
Pere Papasseit

ÍNDICE

1. AGUA EN LA SOCIEDAD Y EN LA AGRICULTURA 1

1.1. Los agricultores no son los malos: Alguien tiene que utilizar el agua para producir alimentos 3

Joan Girona

1.2. Necesidades y compatibilidad medioambiental 27

Ignacio Buesa, Diego S. Intriglioglo y Ramón López-Urrea

2. BASES AGRONÓMICAS DEL RIEGO DE PRECISIÓN 47

2.1. Bases agronómicas del riego 49

Mª Rosario Conesa Saura, Juan Miguel Robles García y Juan Gabriel Pérez Pérez

2.2. Determinación de las necesidades hídricas 87

Juan Miguel Ramírez Cuesta, Luis Bonet Pérez de León e Ignacio Buesa

2.3. Estrategias para mejorar el uso del agua. Riegos deficitarios 123

Mª Carmen Ruiz Sánchez y Juan Gabriel Pérez Pérez

2.4. Tecnología del riego 149

Juan Manzano Juárez, César González Pavón, Virginia Palau Estevan e Iban Balbastre Peralta

2.5. Cultivos hortícolas en invernadero 185

2.5.1. Manejo del clima bajo invernadero mediterráneo para aumentar la eficiencia hídrica 185

Mª Cruz Sánchez-Guerrero Cantó, Evangelina Medrano Cortés y Pilar Lorenzo Mínguez

2.5.2. Optimización del uso del agua y fertilizantes en cultivos hortícolas bajo invernadero. Riego a demanda con electrotensiómetros 193

Rafael Baeza Cano

2.5.3. La recirculación en cultivo en sustrato como estrategia para incrementar el ahorro de agua y fertilizantes 213

Evangelina Medrano Cortés, Mª Cruz Sánchez-Guerrero Cantó y Pilar Lorenzo Mínguez

2.6. Programación del riego de los cultivos hortícolas extensivos 227

Natividad Ruiz y Pedro Gavilán

3. USO DE RECURSOS HÍDRICOS NO CONVENCIONALES PARA EL RIEGO 245

3.1. Regeneración de aguas y su reutilización para riego 247

José Francisco Maestre Valero, Victoriano Martínez Álvarez y Alberto Mulero Imbernón

3.2. Marco regulatorio del agua regenerada en la Unión Europea 275

José María Ferrer Villar

3.3. Desalación de agua marina y su aplicación al riego 283

Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira y José Francisco Maestre Valero

4. OTRAS ESTRATEGIAS – FERTILIZACIÓN, TRATAMIENTOS FITOSANITARIOS Y MATERIAL VEGETAL 315

4.1. Estrategias para una fertirrigación sostenible de los cítricos 317

Belén Martínez-Alcántara, Ana Pérez-Piqueres, Isabel Rodríguez, Julia Morales-Alfaro y Ana Quiñones

4.2. Requerimientos y programación del riego de los frutos rojos en la provincia de Huelva. Uso del pronóstico meteorológico 343

Pedro Gavilán y Natividad Ruiz

4.3. Tecnología de aplicación de fitosanitarios y ahorro de agua 367

Emilio Gil

4.4. Programas de mejora de portainjertos en hortícolas: alcanzar la tolerancia a estrés hídrico es posible 391

Yaiza G. Padilla, Ramón Gisbert-Mullor, Salvador López-Galarza y Ángeles Calatayud

4.5. Portainjertos de *Prunus* spp. y otras especies adaptados a la sequía. Sostenibilidad hídrica mediante la mejora genética 411

Beatriz Bielsa, Ignasi Iglesias y María José Rubio-Cabetas

4.6. Patrones de cítricos adaptados al déficit hídrico 435

Amparo Primo-Capella, Eduardo Augusto Girardi, Ignasi Iglesias, María Ángeles Forner-Giner y Mary Rus Martínez-Cuenca

4.7. El olivar en un cambio de época: adaptación a condiciones limitantes de agua y respuesta varietal al riego 451

Luis Rallo, Diego Cabello, Raúl de la Rosa e Ignacio Lorite

5.	**PROCESADO**	**463**
5.1.	**Avances en la gestión del agua para el acondicionamiento de frutas y hortalizas en centrales hortofrutícolas y para el lavado de productos frescos cortados en las plantas de procesado** María Isabel Gil	465
5.2.	**Ahorro de agua en las centrales hortofrutícolas** Pilar Plaza, Natàlia Alòs, Sara Acosta, Maribel Abadias, Elena Costa y Neus Teixidó	479
6.	**PROYECTOS**	**499**
6.1.	**ADOPTA - Adopción de nuevas tecnologías para la reducción de fitosanitarios. Drones y satélites para aplicación variable en viñedo y olivar**	501
6.2.	**AGRO-VAL - Nuevos desarrollos a partir de productos agrícolas para un sector primario sostenible**	503
6.3.	**DESALICitrus - Manejo sostenible del agua marina desalinizada con alto contenido en boro para el riego en cítricos**	507
6.4.	**DIFERA - Digitalización agraria para la Fertirrigación y gestión de las Estaciones de Regeneración de Aguas**	509
6.5.	**DigitalRiego - Una nueva modernización del regadío valenciano basada en la digitalización y las nuevas tecnologías**	511
6.6.	**Evaluación de distintas estrategias de manejo del riego para la optimización productiva del cultivo del aguacate en las condiciones de cultivo de Callosa d´en Sarrià**	513
6.7.	**HANDYWATER - Herramientas de fácil uso para un manejo sostenible del riego en cultivos mediterráneos**	516
6.8.	**HidroSOStoneFruit - Estrategias hidroSOStenibles en frutales de hueso: Caso a estudio el albaricoquero**	519
6.9.	**MEDPOME-STONE - Valorizing some pome and stone fruit germplasm variability to ensure resilience to climate change in the Mediterranean area**	521
6.10.	**PIVOS - Pulverización Inteligente para un Viñedo y Olivar Sostenibles**	523
6.11.	**Prácticas agronómicas para el control de la incidencia de la Tinta provocada por *Phytophthora* spp. en cultivos de castaño con riego del norte de Extremadura**	525
6.12.	**REFEX - Transferencia de buenas prácticas resultantes de trabajos consolidados de investigación para promover la gestión eficiente de los regadíos en Extremadura**	528
6.13.	**VEGE-PACK - Envases compostables (FILM y MALLA) funcionalizados con productos procedentes de residuos vegetales**	530

EMPRESAS PATROCINADORAS

ARRIGONI	44
CAJAMAR	26
CID BIO-SCIENCE	118
CITROSOL	80
COPERSA	148
GREEN LEGACY	81
IOLAND	432
JOHN DEERE	364
KEPWATER ENGINEERING	224, 410
MASSÓ AGRO	363
REGABER	434
SMARTWASH SOLUTIONS	464
TORO	146, 184, 226
VAM WATERTECH	498
WISECONN	182

BLOQUE I. AGUA EN LA SOCIEDAD Y EN LA AGRICULTURA

1.1. Los agricultores no son los malos: Alguien tiene que utilizar el agua para producir alimentos

Joan Girona

Programa Uso Eficiente del Agua en Agricultura, Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA)

joan.girona@irta.cat

Índice

1. Las bases productivas del agua en agricultura 4
1.1. La dependencia de agua de las plantas 4
1.2. Cuanta agua se requiere para producir alimentos 7
1.3. Como llega esta agua a los cultivos 8
1.4. Cuanta agua debemos aplicar a los cultivos 10
2. Como se aplica el agua a los Cultivos 10
2.1. Como se aplica el agua de riego a los cultivos 10
2.2. El sistema de riego 11
2.3. La programación del riego 11
2.4. Las estrategias de riego que no cubren la demanda total del cultivo 14
2.5. La complejidad de una gestión adecuada del riego 14
2.6. La producción de alimentos 15
2.7. El cambio climático 15
2.8. Eficiencia en el uso del agua 15
3. El papel de los agricultores 17
3.1. Análisis de algunos razonamientos infundados 18

Resumen

Tradicionalmente ha existido, y en cierta medida sigue existiendo, cierto recelo sobre el uso del agua en agricultura. En los países húmedos es difícil entender que en otras zonas del mundo se pueda utilizar agua rodada o de pozos para el riego de los cultivos, e incluso una importante mayoría de la población de los países secos no entiende porque la agricultura debe movilizar volúmenes tan importantes de agua. Se estima que en los países donde se riegan los cultivos, la agricultura utiliza un 70% del agua destinada a usos consuntivos (ciudades, agricultura, industria, ...). La razón de este importante uso está principalmente en que el agua es el elemento imprescindible para la producción de alimentos, de tal forma que podemos afirmar rotundamente que sin agua no hay alimentos y que la capacidad de producir alimentos depende

directamente del volumen de agua del que disponen las plantas. El uso del agua en la agricultura no es un capricho de los agricultores sino una necesidad imperativa para que la sociedad pueda disponer de alimentos. Los agricultores "no son tan malos", hacen uso de un recurso imprescindible para producir estos alimentos y asegurar su subsistencia. El cambio climático, el aumento de la población mundial y las inestabilidades internacionales presionan el sistema productor de alimentos, lo que implica que hay que ser mucho más eficiente en el uso de estos recursos y de forma muy especial en el caso del agua: hay que producir más alimentos con menos agua. Un reto ineludible que recae sobre el sector agro, y que nos interpela a todos a hacer un uso muy eficiente del recurso agua. Agricultores, técnicos, administración deben adaptarse a esta realidad, pero también, y de forma muy especial la sociedad, no se trata tan solo de que los agricultores puedan seguir produciendo alimentos, se trata de que haya suficientes alimentos para abastecer la demanda de la población mundial.

1. **Las bases productivas del agua en agricultura**

1.1. La dependencia de agua de las plantas

Las funciones de producción son una buena forma de visualizar la dependencia de agua que tienen las plantas para producir alimentos (Hanks, 1974) (Figura 1). De la función de producción para el maíz se puede deducir que si se quiere producir 20 t/ha, el cultivo debería evapotranspirar 600 mm de agua, mientras que, si tan solo se dispusiera de 400 mm para la evapotranspiración del cultivo del maíz, la producción esperada no estaría más allá de las 12 t/ha. Las funciones de producción no tan solo ponen de manifiesto que para producir alimentos los cultivos deben transpirar agua, sino también que la producción es proporcional al agua que pueden utilizar nuestros cultivos.

Aunque en su origen las funciones de producción se establecieron para cultivos anuales extensivos (maíz, trigo, …), el resto de los cultivos también responden a este concepto. En el manual de Riego y Drenaje de FAO 66 (Respuesta de los cultivos al agua) (Steduto *et al*., 2012) se pueden encontrar numerosas funciones de producción. En el caso de los cultivos leñosos permanentes (frutales, frutos secos, viña, olivo, ...) estas funciones suelen estar condicionadas por las características del cultivo (marco de plantación, variedad, niveles de carga y/o aclareo (caso de la fruta dulce)) pero si se hace una generalización de las producciones y la demanda podemos de nuevo asegurar esta dependencia de la producción a las disponibilidades de agua (agua evapotranspirada por el cultivo) (Figura 2). En el caso del almendro (Girona, 2024) se puede observar esta dependencia, y además de forma muy nítida. También el caso de otros leñosos se han obtenido estas funciones de producción.

Desde un punto de vista más fisiológico podríamos preguntarnos el porqué de esta dependencia, y la primera, de varias razones que la explican, está en la fuerte correlación entre el agua transpirada por el cultivo y la entrada de dióxido de carbono en la planta, que es el elemento imprescindible para la fotosíntesis (Figura 3). La fotosíntesis, además de la dependencia del agua, es también dependiente de la luz, la temperatura y la disponibilidad de CO_2, básicamente (Ecuación 1):

$$nCO_2 + 2nH_2O + energía\ lumínica \rightarrow (CH_2O)_n + nO_2 + nH_2O \quad \text{(Ec. 1)}$$

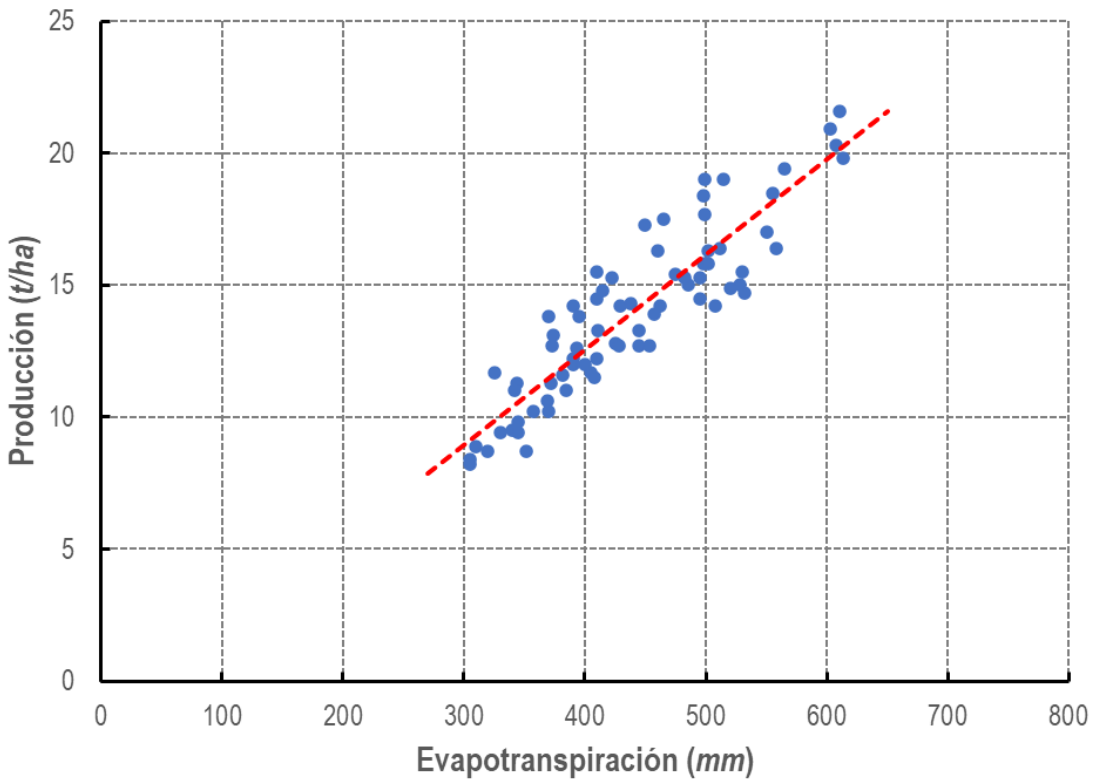


Figura 1. Relación entre la producción del maíz y la evapotranspiración del cultivo. Datos conjuntos de dos experimentos (Fort Collins y Davis (USA)) (Hanks, 1983)

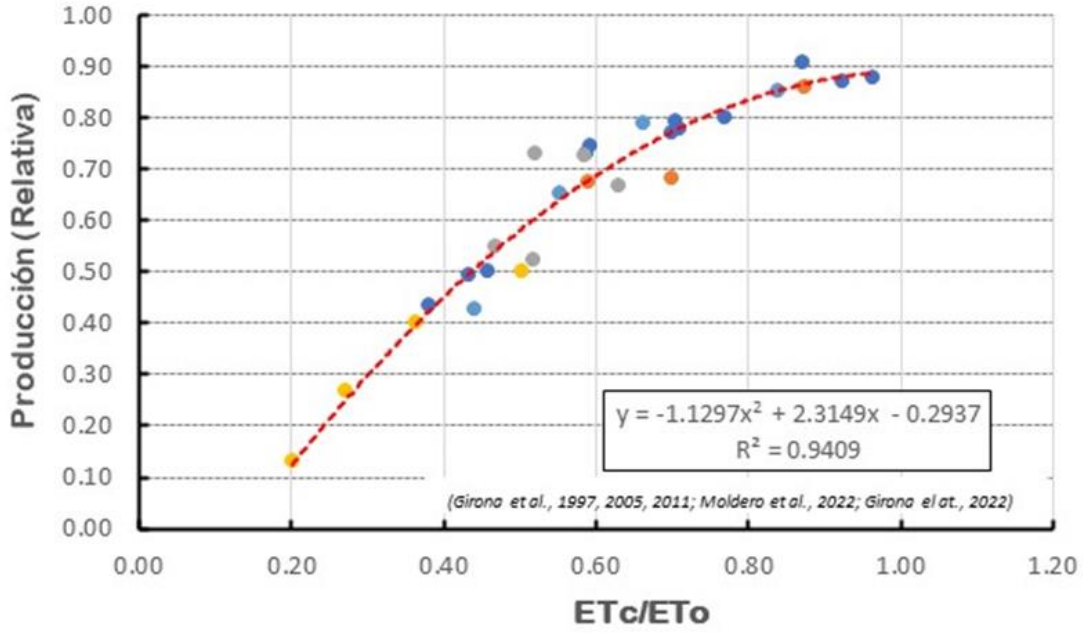


Figura 2. Función de producción del almendro para las zonas productoras de España. Estimación de la producción relativa esperada en base a la ratio ETc/ETo (disponibilidad de agua para el cultivo en relación con su demanda potencial) (Girona, 2024)

El agua que transpiran las plantas transcurre principalmente por los estomas que se encuentran usualmente en el reverso de las hojas (Figura 4): los estomas son unos pequeños (microscópicos) orificios, que pueden abrirse y cerrarse en función del flujo de vapor de aire que la planta

transpire, y por los cuales también entra el CO_2 en la planta. Precisamente el hecho de que por el mismo orificio salga el vapor de agua y entre el CO_2 crea una extraordinaria dependencia que hace que el CO_2 que entre en la planta esté altamente correlacionado con el volumen de agua transpirada.

La relación entre la transpiración y la fotosíntesis es lo que permite cuantificar el agua que debe transpirar un cultivo para producir una determinada cantidad de biomasa. En general, las plantas transpiran mucha más agua que el CO_2 que entra por los estomas. Por cada átomo de Carbono fijado, las plantas transpiran entre 100 y 400 moléculas de agua (Bailey-Serres *et al*., 2019).

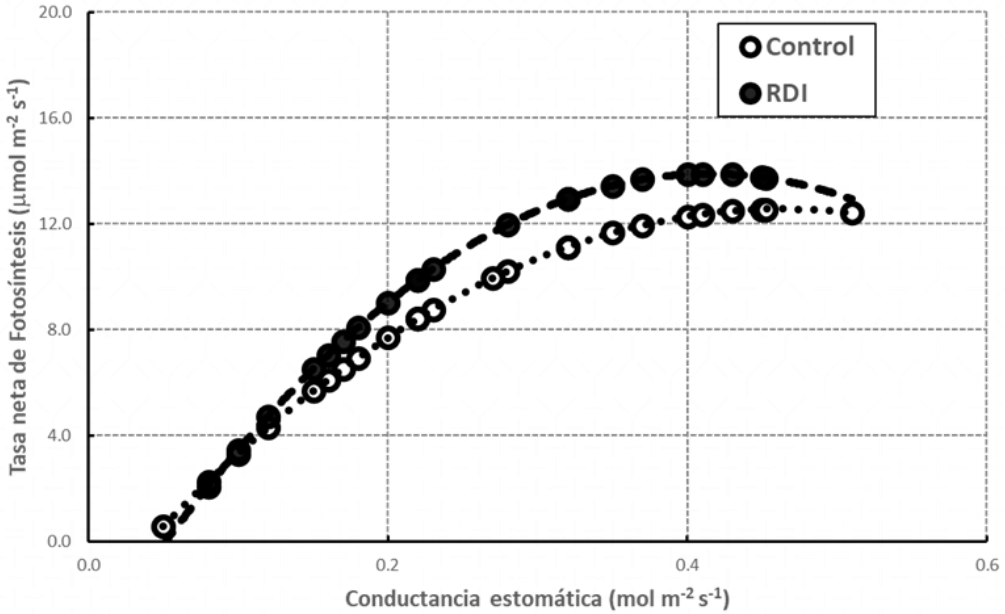


Figura 3. Relación entre fotosíntesis i Conductancia estomática (como referenciado de Traspiración) en el cultivo del melocotonero (Girona *et al*., 1993)

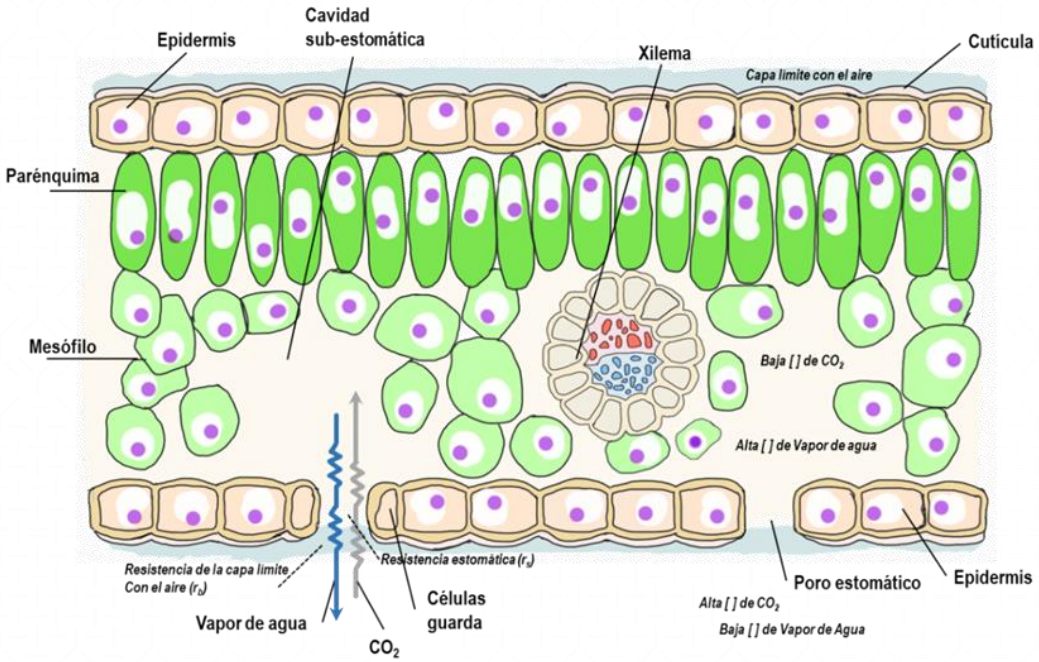


Figura 4. Esquema de la estructura y flujos del vapor del agua y del dióxido de carbono en el corte transversal de una hoja (Girona y Villar, 2021)

1.2. Cuanta agua se requiere para producir alimentos

Visto que para producir alimentos se requiere agua, la siguiente pregunta que cabe hacernos es cuanta agua requiere producir estos alimentos. El concepto de huella hídrica (Hoekstra y Chapagain, 2007) nos proporciona un buen indicador para visualizar la magnitud de los datos. Así, según FAO (FAO, 2012) para producir un kg de maíz se requieren 350 litros de agua, para producir una manzana unos 70 litros de agua, y para producir un bistec de ternera de 500 g unos 7.000 litros de agua, y así con todos los alimentos (Tabla 1).

Tabla 1. Requerimientos de agua para producir diferentes alimentos y bienes

Producto	WaterFoot Print Network					FAO	
	litros	Unidades	Agua			litros	Unidades
			Verde	Azul	Gris		
Pan	1608	*(l/kg)*	70%	19%	11%	40	*(l/rebanada)*
Pasta (seca)	1849	*(l/kg)*	70%	19%	11%		
Arroz	2497	*(l/kg)*	68%	20%	11%		
Maiz	1222	*(l/kg)*	77%	7%	16%		
Col	237	*(l/kg)*	56%	12%	32%		
Lechuga	237	*(l/kg)*	56%	12%	32%		
Pepino	353	*(l/kg)*	58%	12%	30%		
Tomate	214	*(l/kg)*	50%	30%	20%	13	*(l/unidad)*
Patata	287	*(l/kg)*	66%	11%	22%	25	*(l/unidad)*
Papatas fritas						185	*(l/bolsa)*
Aceitunas	3015	*(l/kg)*	82%	17%	2%		
Azúcar (zanahoria)	920	*(l/kg)*	62%	19%	19%		
Azúcar (caña)	1782	*(l/kg)*	66%	27%	6%		
Naranja	560	*(l/kg)*	72%	20%	9%	50	*(l/unidad)*
Melocotón	910	*(l/kg)*	64%	21%	15%		
Manzana	822	*(l/kg)*	69%	16%	15%	70	*(l/unidad)*
Mango	1800	*(l/kg)*	73%	20%	7%		
Dátil	2277	*(l/kg)*	41%	55%	4%		
Plátano	790	*(l/kg)*	84%	12%	4%		
Cacao	2782	*(l/kg)*	89%	5%	6%		
Chocolate	17916	*(l/kg)*	98%	1%	1%		
Taza de Te	27	*(l/taza) (250 ml)*	82%	10%	8%	35	*(l/taza)*
Café	132	*(l/taza) (125 ml)*	96%	1%	3%	140	*(l/taza)*
Cerveza	74	*(l/copa) (250 ml)*	85%	6%	9%	75	*(l/copa)*
Copa de Vino	109	*(l/copa) (125 ml)*	70%	16%	14%	120	*(l/copa)*
Algodón	2495	*(l/camiseta) (250 gr)*	54%	33%	13%		
Pizza Margharita	1259	*(l/pizza)*	76%	14%	10%		
Leche	255	*(l/ vaso) (250 ml)*	85%	8%	7%	200	*(l/ vaso)*
Leche en plovo	4745	*(l/kg)*	85%	8%	7%		
Huevos	196	*(l/66 gr de huevo)*	79%	7%	13%	135	*(l/unidad)*
Mantequilla	5553	*(l/kg)*	85%	8%	7%		
Pan con Mantequilla						90	*(l/rebanada)*
Queso	3178	*(l/kg)*	85%	8%	7%		
Carne de pollo	4325	*(l/kg)*	82%	7%	11%		
Carne de Porcino	5988	*(l/kg)*	82%	8%	10%		
Carne de cabra	5521	*(l/kg)*	94%	6%	0%		
Carne de Cordero	10412	*(l/kg)*	94%	5%	1%		
Carne de Ternero	15415	*(l/kg)*	94%	4%	3%	7000	*(l/1 Bife) (500 g)*
Hamburguesa						2400	*(l/unidad) (*)*

Requerimientos de agua para producir alimentos y bienes de dos fuentes diferentes: WaterFoot Print Network (WFP-N, 2024) y FAO (FAO 2012a y b). En las columnas del WFP-N se detalla el origen de esta agua (Verde, Azul y Gris) de acuerdo con la clasificación de Mekonnen y Hoekstra (2011).
(*) se refiere a una hamburguesa completa donde se contemplan todos sus componentes: la carne, el pan, las hortalizas y los condimentos.

En este contexto también se ha determinado el volumen necesario de agua que los cultivos deben utilizar para producir los alimentos que una persona consume en un día, y a grandes rasgos podríamos decir que para producir los alimentos que un europeo medio consume al día se requieren 3.500 litros de agua (Hoekstra y Chapagain, 2007; FAO, 2024) y si se trata de un estadounidense medio se requieren 4.000 litros de agua. La diferencia de requerimientos hídricos entre el europeo y el estadounidense pueden deberse básicamente al tipo de dieta de cada uno.

Si queremos escalar estos valores a un territorio para determinar los volúmenes de agua necesarios para producir los alimentos que requiere su población durante un año, tenemos cifras realmente importantes. Por ejemplo, para producir los alimentos que los habitantes de Catalunya (8.000.000 habitantes) demandan durante un año, aplicando el indicador de 3.500 litros/día, resulta un volumen de agua de 10.220 hm^3, volumen de agua independiente de su procedencia inmediata (lluvia, riego, reservas del suelo, etc.), pero en todo caso un volumen extremadamente superior a las disponibilidades de agua para agricultura en Catalunya. Si hacemos los mismos cálculos para España se observa que los requerimientos de agua para producir los alimentos que demandan los 48 millones de habitantes ascienden a 62.342 hm^3. Dado que a veces resulta difícil visualizar lo que significan estos grandes números, podemos utilizar como referencia un estadio de futbol, por ejemplo, el ya antiguo del FC Barcelona, donde, si en vez de ser lo que era, hubiese sido una gran balsa, ésta habría podido almacenar 1,26 hm^3, agua suficiente tan solo para producir alimentos para 247 familias/año (familias de 4 miembros). ¿Cuántos estadios de futbol llenos de agua necesitamos para alimentar Catalunya, o toda España?, muchísimos. Los requerimientos de agua para producir los alimentos en otros países estarían en el orden de: 78.130 hm^3 (Francia), 85.324 hm^3 (Alemania), o 408.958 hm^3 (Estados Unidos de América del Norte) Hoekstra y Chapagain, 2007).

1.3. Como llega esta agua a los cultivos

Cuando llueve o cuando se riega, que son dos formas de aportar agua de otra procedencia a un cultivo, lo primero que sucede es que se deposita agua al suelo para que, una vez infiltrada en el suelo, pueda ser utilizada por las plantas (Figura 5). A diferencia de los animales las plantas carecen de movilidad y debe aportarse el agua cerca (o muy cerca) de donde se ubican sus raíces.

Una vez el agua se encuentra en el suelo, las raíces más próximas la pueden adsorber y circula por toda la planta hasta llegar a las hojas donde de forma mayoritaria se evapora (transpiración) de nuevo al ambiente.

Es importante tener en cuenta que no toda el agua que se deposita en el suelo (independientemente de su procedencia) es adsorbida por las plantas. Parte del agua aportada puede que se ubique en zonas del suelo donde no existen raíces y/o que percole a capas más profundas del suelo (agua que puede alimentar acuíferos u otros huertos de cota inferior, pero que no se puede ya utilizar en el cultivo donde se infiltra), y/o que no penetre en el suelo y se pierda por escorrentía, y finalmente una parte del agua inevitablemente, en la mayoría de los sistemas de riego, se evapora directamente desde el suelo sin pasar por la planta. Cuando se habla de eficiencia del riego, una parte importante del concepto queda definido como el porcentaje de agua adsorbida por la planta en referencia al agua aportada (Ecuación 2). Tener un sistema de riego con una alta eficiencia indica que un porcentaje elevado del agua aplicada es adsorbida por las raíces y transpirada al ambiente lo que nos asegura una alta capacidad de

producir Hidratos de Carbono a través de la Fotosíntesis (Figura 3) (Ecuación 1). En términos generales más del 99% del agua aplicada a un cultivo es transpirada por las hojas.

$$Eficiencia\ Sistema\ de\ Riego = \frac{Agua\ absorbida\ por\ la\ raíz}{Agua\ aportada} \text{ (Ec. 2)}$$

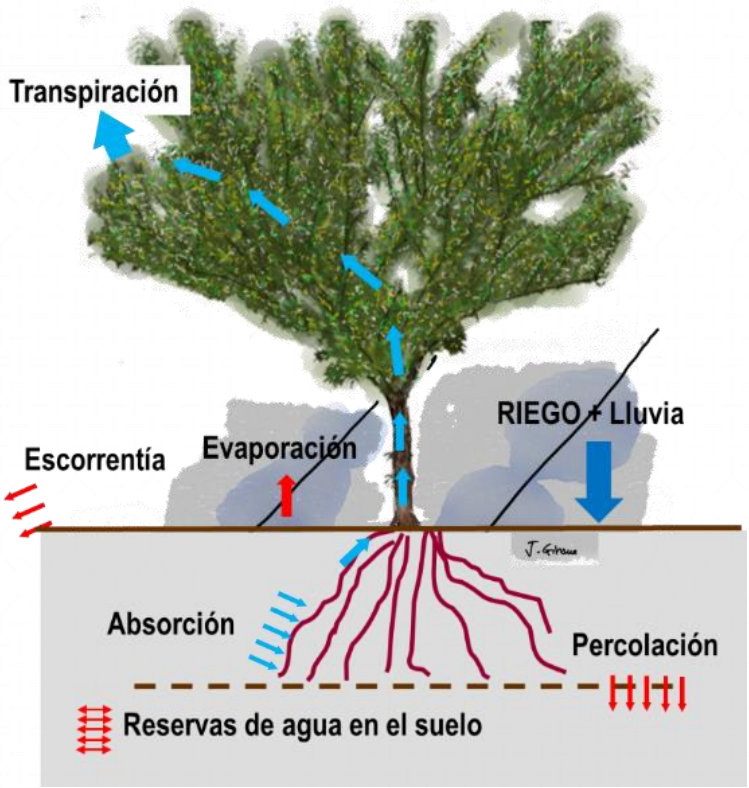


Figura 5. Circuitos del agua en el continuo agua-planta-atmósfera que son relevantes para la comprensión del aporte de agua a las plantas

En la práctica es difícil determinar los volúmenes reales de agua adsorbida por las plantas. Experimentalmente existen diferentes aproximaciones que lo permitirían como son los sistemas lisimétricos (Girona *et al*, 2001), el balance de agua en el suelo (Fereres *et al*., 1982; Girona *et al.*, 2002) o los modelos empíricos (Phogat *et al*., 2017). Pero todo aquello que reduzca los otros destinos del agua (pérdidas en términos de riego) mejora sin duda la eficiencia del riego.

Para tener una eficiencia de aplicación alta es igualmente importante conocer que volumen de agua hay que aportar en cada riego, lo que dependerá de la capacidad de retener agua que tenga nuestro suelo en la zona explorada por las raíces, y de la demanda hídrica del cultivo. Tener un conocimiento preciso de estos dos aspectos es determinante en la eficiencia de nuestro sistema de riego más allá de las características propias del sistema.

Utilizar toda la información disponible para ajustar los volúmenes de riego a los requerimientos del cultivo minimizando las pérdidas de agua (agua que no se adsorbe por las raíces) es básico, aunque complejo, en el manejo del agua en la agricultura. La eficiencia no tan solo depende de la gestión del agricultor sino también, y en algunos casos de forma muy determinante, de cómo la Comunidad de Regantes facilite el acceso al agua. Comunidades que aportan agua al regante con una frecuencia quincenal y en caudales instantáneos muy importantes no ayudan en nada a disponer de una alta eficiencia (a no ser que el regante disponga de balsas propias de regulación), mientras que Comunidades que suministran el agua prácticamente a la demanda y

flujos ajustados a la capacidad del sistema de riego, por supuesto que ayudan de forma considerable a la mejora de la eficiencia de aplicación.

1.4. Cuanta agua debemos aplicar a los cultivos

La productividad de los cultivos está altamente relacionada con el volumen de agua que puedan transpirar (Figuras 1 y 2), y en consecuencia si se pretende tener la producción máxima potencial de un cultivo se debería aplicar aquel volumen de agua que satisfaga la transpiración potencial del cultivo.

Dado que, en términos generales y para la mayoría de los sistemas de riego, la evaporación del agua de la parte superior del suelo es inevitable, se considera que el agua que demanda el cultivo es la suma del agua potencialmente transpirada por el cultivo (T) y de la evaporada directamente desde el suelo (E), de donde sale el concepto de Evapotranspiración (ET). Cuando esta ET se refiere a un cultivo específico se utiliza el término de Evapotranspiración de cultivo (ETc). Además, el concepto de ET se ajusta muy bien a un análisis físico-ambiental del movimiento de vapor de agua en la atmósfera, lo que permite realizar estimaciones de la ET en base a datos climáticos, y determinar así la Evapotranspiración de Referencia (ETo) (Allen *et al*., 1998 (FAO 56)). Bajo esta visión del movimiento del vapor de agua y flujos de energía se han desarrollado también procedimientos que, en base a la teledetección, nos proporcionan estimaciones de la ET muy útiles a nivel local (finca) y regional (Guzinski *et al*., 2020; Bellvert *et al*., 2024).

Conocer con cierta precisión la demanda hídrica de los cultivos (ETc) es uno de los puntos importantes para la mejora de la eficiencia productiva del agua. Utilizar coeficientes de cultivo (Kc) (Allen *et al*., 1998 (FAO 56)), sensores de agua en el suelo para medir las reservas o el estado hídrico del suelo (Dominguez-Niño *et al*., 2019), equipos ambientales para estimar la demanda (Casadesus *et al*., 2011), o medir por diferentes aproximaciones el estado hídrico de las plantas (Girona 2006, Bellvert 2016), son aproximaciones que ayudan al objetivo de aplicar con precisión el agua que demanda el cultivo.

2. Como se aplica el agua a los Cultivos

2.1. Como se aplica el agua de riego a los cultivos

Dado que la práctica del riego se basa en depositar agua en la zona de los cultivos y cerca de cada una de las plantas, con agua que proviene de fuera de la propia parcela de cultivo, esta agua debe transportarse desde el punto donde se encuentre hasta la parcela de cultivo, y dentro de la parcela distribuirla de la forma más precisa y uniforme a todas las plantas. En este contexto es evidente que la forma en la que el agua llegue a la parcela puede ser determinante en el cómo posteriormente se distribuya internamente. Para simplificar el relato vamos a suponer dos escenarios (probablemente los escenarios extremos de los múltiples casos que se puedan dar). Uno de ellos sería que el agua llegase a la parcela con intervalos largos (dos o más semanas entre eventos de disponibilidad de agua) y volúmenes puntuales muy elevados (entre 600 y 1000 m^3/ha en cada evento de riego), el otro escenario sería que el agua esté disponible de forma continua a la demanda del agricultor y con el volumen que se pueda requerir en cada momento (de 10 a 80 m^3/ha y evento de riego).

2.2. El sistema de riego

En el primero de los escenarios, lo habitual es que el agricultor aplique en riego por inundación el volumen de agua que se le concede, y si la aplicación ha sido uniforme en la finca resulta que se dispone durante varios días de humedad en el suelo que permitirá ir suministrando agua a las plantas. No obstante, es muy difícil que la distribución de agua sea uniforme en la parcela por lo que habrá partes de misma en que pueda almacenar más agua que otras, y es muy normal que existan pérdidas considerables por percolación en profundidad y escorrentía superficial (Figura 5). Adicionalmente si la capacidad de almacenar agua en el suelo es inferior a la demanda de agua del cultivo entre riego y riego, el cultivo se verá sometido a un déficit hídrico considerable los días finales del período entre riegos, lo que perjudica a su vez a la producción del cultivo (Figura 1). La eficiencia de aplicación en este escenario podría estimarse en el intervalo del 50 al 65%.

El segundo escenario permite utilizar sistemas de riego localizado, donde el agua se aplica cerca de las raíces de cada planta, y posibilita que la aplicación esté acorde con la demanda hídrica del cultivo, lo que permite una eficiencia alta del sistema de riego (debería ser superior al 90%) y a su vez una producción también alta porque se ha asegurado la máxima evapotranspiración del cultivo (Figura 1).

2.3. La programación del riego

En aquellos sistemas de riego que lo permitan porque el regante dispone de los grados de libertad suficientes como para decidir frecuencia y duración de los riegos, características que se dan en el segundo escenario de los descritos anteriormente y muy difícilmente en el primero de ellos, la programación del riego es una tarea vital para asegurar un suministro de agua a la planta correcto y ajustado en el tiempo.

El procedimiento más habitual para programar el riego es ajustarse al método del balance hídrico donde se estiman los requerimientos hídricos del cultivo (ETc) utilizando la evapotranspiración de referencia (ETo) determinada con la expresión de Penman-Montheih (Allen *et al*, 1998) a la que se le aplica un coeficiente de cultivo (Kc) (Allen *et al*., 1998 – FAO56) que varía en función del cultivo, el momento del cicló, los sistemas de conducción, el volumen de copa, etc. (Ecuación 3).

$$ETc = ETo * Kc \text{ (Ec. 3)}$$

Podemos encontrar fácilmente los valores de la ETo en las páginas web de los servicios meteorológicos que proporcionan los datos meteorológicos de las redes de estaciones agroclimáticas ubicadas en el territorio. SIAR, MeteoCat, y Euskalmet, son las tres referencias en el territorio español.

Los manuales de FAO 56 y 66 aportan mucha información sobre coeficientes de cultivo (Kc) (más actualizado FAO66 que FAO56) (Tabla 2), pero es aún un parámetro empírico, de gran utilidad para hacer aproximaciones o estimaciones, pero que no siempre es la mejor manera de determinar los requerimientos hídricos de los cultivos. En el uso de los Kc debe tenerse en cuenta que los valores que se aportan en las referencias están normalmente condicionados por el tipo de manejo y en especial por el volumen de vegetación que pueda haber en la parcela de referencia, y que incide sobre la intercepción de radiación (%) (radiación solar adsorbida por el

cultivo en referencia a la radiación solar incidente). Originariamente, en la década de los 70'-80' del siglo pasado, ya se indicó la importancia del volumen de copa (Fereres *et al.*, 1981), y en la actualidad podemos encontrar referencias concretas para muchos cultivos (Ayars et. Al., 2003, Girona *et al.,* 2011), donde se evidencia la importancia del volumen de copa y en consecuencia de la intercepción de radiación en el valor final de Kc (Figura 6). A pesar de sus limitaciones, es un buen procedimiento para tener una aproximación interesante a las necesidades de agua de nuestros cultivos. En algunos casos la experiencia de los técnicos y agricultores ha servido para ajustar los Kc a las características reales de sus cultivos, lo que redunda en una mejora considerable en la determinación de este parámetro.

Tabla 2. Coeficientes de cultivo (Kc) de referencia

Fecha	Coeficientes de Cultivo (Kc) para los cultivos predominantes en el Valle del Ebro										
	Melocotonero	*Almendro*	*Manzano*	*Peral*	*Nogal*	*Olivo*	*Viña*	*Maíz*	*Alfalfa*	*Girasol*	*Soja*
del 1 al 15 de marzo	0.25	0.43	0.30	0.20	0.20	0.70			0.50		
del 16 al 31 de marzo	0.30	0.56	0.30	0.20	0.20	0.70			1.20		
del 1 al 15 de abril	0.45	0.68	0.40	0.30	0.53	0.70			0.50		
del 16 al 30 de abril	0.60	0.78	0.45	0.48	0.68	0.70			1.20		
del 1 al 15 de mayo	0.70	0.90	0.60	0.70	0.79	0.70	0.05		0.50		
del 16 al 31 de mayo	0.80	0.95	0.75	0.80	0.86	0.70	0.15	0.40	1.20		
del 1 al 15 de junio	0.90	0.99	0.82	0.85	0.93	0.70	0.22	0.60	0.50		
del 16 al 30 de junio	0.95	1.02	0.87	0.90	1.00	0.70	0.28	0.90	1.20	0.30	0.40
del 1 al 15 de julio	1.05	1.04	0.92	0.90	1.14	0.70	0.40	1.20	0.50	0.70	0.70
del 16 al 31 de julio	1.05	1.07	0.93	0.90	1.14	0.70	0.55	1.20	1.20	0.90	0.90
del 1 al 15 de agosto	1.05	1.08	0.93	0.90	1.14	0.70	0.35	1.20	0.50	1.15	1.10
del 16 al 31 de agosto	1.00	1.03	0.94	0.70	1.14	0.70	0.25	1.20	1.20	1.15	1.10
del 1 al 15 de septiembre	1.00	0.88	0.95	0.60	1.03	0.70	0.22	1.00	0.50	1.15	0.80
del 16 al 30 de septiembre	1.00	0.78	0.75	0.50	0.93	0.70	0.10	0.55	1.20	1.00	0.60
del 1 al 15 de octubre	0.75	0.64	0.60	0.40	0.82	0.70	0.10		0.50	0.60	
del 16 al 31 de octubre	0.45	0.50	0.55	0.35	0.65	0.70			0.50		

Información básicamente obtenidos de FAO66 (Steduto et al., 2012) y adaptada por el autor a condiciones tipo de los cultivos en el Valle del Ebro

Para determinar los requerimientos netos de riego (RNR) deberá restarse a la demanda hídrica del cultivo (ETc) aquellas aportaciones de agua que pueden proceder de otras fuentes, siendo la más común es el agua de lluvia, aunque pueden existir otras aportaciones como pueden ser las variaciones de agua en el propio suelo (tanto en positivo como en negativo) (ΔCRAD), u otras aportaciones (AA) como las de freáticos muy superficiales que pongan a disposición del cultivo un volumen significativo de agua (Ecuación 4). Para determinar las aportaciones del agua de lluvia deberá tenerse en cuenta la lluvia efectiva (P_{ef}), que es aquella precipitación que realmente se queda en el suelo (Bos et al., 2008).

$$RNR = ETc - P_{ef} - \Delta CRAD - AA \text{ (Ec. 4)}$$

Finalmente, los requerimientos brutos de riego (RBR) se obtienen dividiendo el valor de los RNR por la eficiencia del sistema de riego (Ecuación 5). De forma orientativa, los valores de la eficiencia de aplicación de los sistemas de riego se presentan en la Tabla 3.

$$RBR = {}^{RNG}/_{Ef_{ar}} \text{ (Ec. 5)}$$

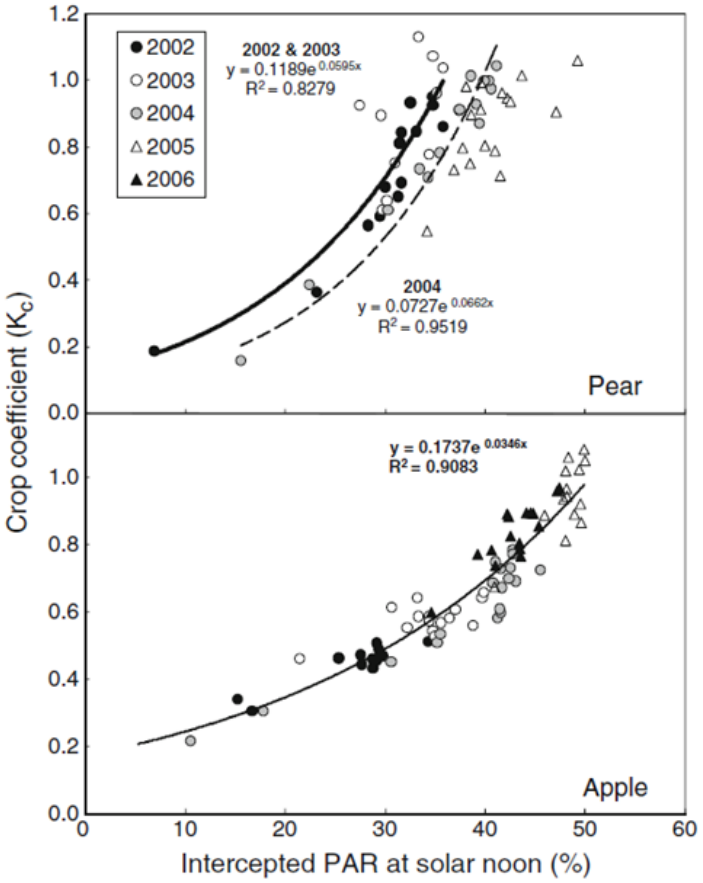


Figura 6. Relaciones entre los porcentajes de radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada al mediodía solar y los coeficientes diarios de cultivo (Kc) para manzanos y perales cultivados con lisímetro desde la brotación hasta la cosecha. En el caso de los perales, las relaciones se ajustaron a ecuaciones exponenciales durante 3 años de evaluación. En el caso de los manzanos, la relación se ajustó a una única ecuación exponencial para todos los años de evaluación. Cada valor de Kc representa el Kc medio calculado 3 días antes y después de las mediciones de PAR (Girona *et al*., 2011)

Tabla 3. Eficiencias de aplicaciones (posible y óptimas) de diferentes sistemas de riego.

Sistema de Riego		Eficiencia de aplicación
Superficie		
	Inundación	0.45 -0.65
	Surcos	0.50 - 0.85
Aspersión		
	Fija	0.70- 0.85
	Carros móviles	0.80- 0.90
	Pivots	0.85
Localizado		
	Superficial	0.90
	Sub-Superficial	0.95

Información adicional (Smith et al., 2005; Dong et al., 2020; Faria et al., 2019)

Adicionalmente al método del balance hídrico existen diferentes procedimientos para determinar los requerimientos hídricos del cultivo que pueden basarse en sensores (agua en el suelo, sensores de planta, ...), teledetección (satelital o en base a otro tipo de captadores de imágenes aéreas), el estado visual de la vegetación de los cultivos o en base a medidas puntuales del estado hídrico de los cultivos. Cualquiera de ellos es válido si permite un ajuste preciso de los requerimientos hídricos de cada unidad de cultivo.

Una vez evaluados los RBR hay que determinar con qué frecuencia se aplican. Existe una tendencia predominante a regar de forma diaria, o cada dos días, cuando los requerimientos del cultivo pasan de los 2-3 mm. La forma precisa de determinar la frecuencia debería basarse en la capacidad de almacenar agua que tiene el suelo de la parcela de cultivo (cuanta agua se puede ubicar en un suelo hasta la profundidad equivalente a donde llegan las raíces del cultivo) (Figura 3). Si no se ajusta la frecuencia de riego y se riega con una frecuencia excesiva podría ser que el agua no llegase a humedecer la totalidad del perfil del suelo que aloja a las raíces con lo que se pierde potencial de transpiración, mientras que si se riega con una frecuencia muy baja y en consecuencia volúmenes de agua en cada evento de riego muy grandes el agua penetrará en el suelo hasta profundidades por debajo de la zona donde están las raíces y en consecuencia esta es agua que se pierde.

2.4. Las estrategias de riego que no cubren la demanda total del cultivo

Ya sea por qué no se dispone del agua suficiente como para cubrir los requerimientos del cultivo (Alegre *et al*. 2002) o porque se quiere mejorar la calidad del producto (Anderson *et al*, 2024; Fereres y Evans, 2006; Girona *et al* 2006) o la gestión integral del cultivo (Girona *et al*. 2003), se pueden aplicar volúmenes de agua de riego inferiores a la demanda total del cultivo, ubicando las restricciones en aquellos momentos del ciclo fenológico i/o fisiológico en que el cultivo presente la mínima sensibilidad al déficit hídrico..

Los casos más relevantes serían las estrategias de riego deficitario controlado (RDC) (Girona *et al*., 2003; Fereres and Soriano, 2007) en las que se somete el cultivo a un déficit controlado en aquella fase (o aquellas fases) de su ciclo anual que previamente se hayan determinado como más adecuadas para estas estrategias. En estos casos no es tan solo crítico determinar el momento en que se aplica el déficit hídrico sino también la intensidad del déficit y su duración.

2.5. La complejidad de una gestión adecuada del riego

En los apartados anteriores se han analizado diferentes aspectos básicos de la gestión del riego y ya se puede apreciar la complejidad que supone la aplicación del riego de una forma rigurosamente eficiente. Diferentes son los aspectos que deben tenerse en cuenta, y dada la variabilidad propia del campo el poder aplicar el agua con una alta precisión en parcelas comerciales es una tarea muy difícil.

El uso de modelos de simulación, herramientas digitales y plataformas que integren toda la información de cada unidad de riego (las variables climáticas, las disponibilidades de agua, la evolución del cultivo y el resto de las características básicas), deben interactuar directamente con el programador de riego es básico para mejorar la eficiencia de nuestros sistemas de riego y la productividad de estas parcelas.

En la actualidad existe un gran interés por el desarrollo de estas herramientas y diferentes grupos de investigación están desarrollando aplicaciones con esta visión (Casadesús *et al*., 2012; Dominguez-Niño *et al*., 2019; Katz *et al*., 2022; Bellvert *et al*., 2023).

2.6. La producción de alimentos

Uno de los principales objetivos de la agricultura es el de producir alimentos para la población, y la demanda total de alimentos depende en gran medida de la población final. A nivel planetario en la actualidad hay unos 8.2 mil millones de habitantes cuando en 1950 se estima que había un 2.5 mil millones y las previsiones son que para el 2050 la población mundial alcance los 9.5 mil millones para llegar al máximo de 10.4 para el 2080 (ONU, 2024; Worldmeter, 2024).

Diferentes organismos internacionales avisan que podría existir una crisis de alimentos debido al cambio climático y al aumento de la población mundial, que se ven acentuados por otros factores como los cambios de dieta y la malversación de alimentos (FAO *et al*., 2024; IPPC, 2023). En la actualidad un 28.9% de la población mundial (8.7% en Europa i Norte América) tiene una seguridad alimentaria baja o muy baja, entendiendo seguridad alimentaria como la capacidad para acceder (por disponibilidad, cantidad, precio y accesibilidad) a los alimentos (FAO *et al.,* 2024).

La agricultura de regadío produce, a nivel mundial, alrededor del 40% de todos los alimentos y fibras en aproximadamente el 16% de todas las tierras cultivadas. Con el cambio climático, aparte de reducir las disponibilidades de agua para el regadío y aumentar las temperaturas, se afectará gravemente a las zonas áridas de no regadío dado que en las de regadío el suministro del agua puede ser menos variable por el propio aporte de agua de riego, aunque éste sea mínimo, pero en los secanos áridos si deja de llover, o la lluvia se ve gravemente reducida, no hay alternativa.

2.7. El cambio climático

La climatología de los próximos años será básicamente más calurosa y con mayor irregularidad pluviométrica, lo que se convierte en un incremento de la demanda evapotranspirativa para las plantas debido al aumento de las temperaturas y caída de las disponibilidades de agua como consecuencia de la irregularidad de las precipitaciones, con la sombra de la aparición de episodios de sequía más frecuentes e intensos. Las previsiones de aumento de temperatura para la península ibérica son de 4 °C para finales de siglo (OECC, 2022), lo que podría suponer un incremento superior al 12% de la demanda hídrica de los cultivos.

2.8. Eficiencia en el uso del agua

Ante este panorama, la agricultura de regadío tiene el reto de asegurar alimentos para una población creciente donde los recursos, entre ellos el agua, van a ser más restringidos y escasos, lo que obliga a ser mucho más eficientes, y probablemente estratégicos, en su uso.

Un buen ejemplo para poder visualizar y cuantificar la potencial mejora de la eficiencia en el uso productivo del agua se presenta en la Tabla 4 en la que se reflejan los valores de agua utilizada, producción final e índice productivo (en este caso, la ratio “litros de agua/manzana”) para diferentes escenarios de gestión del riego en la producción de manzana en Lleida.

Mientras que para producir una manzana regada con un sistema tradicional por gravedad (inundación) y riego a turnos de aproximadamente 15 días, con una tecnología tradicional y baja eficiencia de aplicación del agua en parcela (no de transporte de agua desde el origen a la parcela, que puede ser incluso sofisticada) se requieren unos 54 litros de agua de riego. Para producir esta misma manzana aplicando un nivel alto de conocimiento y tecnología (sistemas de riego localizado de alta precisión y fiabilidad, programación de riego, sensores y controles puntuales del estado hídrico de la planta, estrategias de RDC) se puede conseguir con 17 litros de agua, una tercera parte de lo requerido con el riego por gravedad.

Tabla 4. Resultados más significativos de la comparación de eficiencia productiva del riego en manzano (Girona *et al*., 2012)

Riego			Tecnologia / Conocimiento		Producción	Riego	H. Hídrica P.	Ef. Prod.
Tipología	**Sistema**	**Frecuencia**	**Tipología**	**Valoración**	*(t/ha)*	*(m^3/ha)*	*(l/manzana)*	*(kg/m^3)*
Tradicional	Gravedad	15 días	Uso tradicional	Muy Poca	39.0	9000	53.7	4.33
Localizado	Gota a Gota	Ind.	SR	Poca	40.1	8200	47.6	4.89
Localizado	Gota a Gota	PR	SR + PR	Media	42.6	5350	29.2	7.96
Localizado	Gota a Gota	PR	SR + PR	Media	44.8	5300	27.5	8.45
Localizado	Gota a Gota	PR	SR + PR + CP	Alta	53.6	5400	23.4	9.93
Localizado	Gota a Gota	PR	SR + PR + CP	Alta	69.3	6430	21.6	10.78
Localizado	Gota a Gota	PR	SR + PR + RDC + CP	Muy Alta	74.8	5470	17.0	13.67

PR = Programación de Riego; SR = Sistema de Riego; CP = Controles puntuales (en el tiempo y/o en el espacio) (Sensores, medidas del estado hídrico del manzano, etc.); RDC = Riego Deficitario Controlado; H. Hídrica P. = Huella Hídrica Parcial donde solo se contempla el ratio litros necesarios para producir una manzana; Ef. Prod. = Eficiencia Productiva (kg de manzana que se pueden producir con un m^3 de agua de riego)

La importancia de la tecnología y el conocimiento en la gestión del riego es determinante, así se puede observar como la columna de la Huella Hídrica Parcial (Tabla 4) a medida que la Tecnología y el Conocimiento entran en juego, los litros necesarios para producir una manzana disminuyen, lo que indica que la eficiencia productiva se incrementa.

Ante los efectos del Cambio Climático, el aumento de la población mundial, los cambios en costumbres alimenticias, y las incertidumbres estratégico-políticas a nivel mundial (FAO, 2022), el uso del agua para producir alimentos es clave para la sostenibilidad del planeta, y la mejora de la eficiencia productiva del agua (en los términos que se presenta en la tabla 4) resulta inequívocamente imprescindible.

Los datos de la Tabla 4 se han obtenido en las condiciones agroclimáticas de la zona productora de manzana de Lleida. Los valores de huella hídrica del escenario de riego tradicional (gravedad-inundación cada 15 días) se ajustan mucho a los valores que reporta FAO (tabla 3) (70 l/manzana), ya que en los valores de FAO incluye agua Verde y Agua azul, por lo que si a los datos de la tabla 4 de 53.7 le añadimos unos 16 litros que se evaluó procedían de agua de lluvia, tendríamos 69.7 l/manzano, valor muy próximo a los 70 litros de FAO. No obstante, los 69.7 litros/manzana (53.7 de la tabla 4 y los aproximadamente 16 procedentes de la lluvia) están muy lejos de los 212 l/manzana que reporta el WFP-N (Tabla 1) (882 litros/kg de manzana, donde el 81% es agua verde y azul), lo que nos sugiere que en función de las condiciones agroambientales de la zona donde se produzcan los alimentos los valores de huella hídrica pueden variar.

3. El papel de los agricultores

Los agricultores son los que hacen posible que cada día tengamos alimentos en nuestras comidas, y para producirlos combinan de la forma más práctica y realista posible todos los factores que entran en el complicado proceso de producir alimentos, también llamado agricultura.

Muchos son los factores que se deben combinar en agricultura para obtener el producto final, y algunos de ellos, como el clima, incontrolable, y otros como el suelo con un grado alto de variabilidad, hacen que la tarea del agricultor tenga que adaptarse de forma continua día a día.

Uno los recursos críticos que debe gestionar el productor es el agua. No únicamente el agua de riego, sino toda el agua que va a disponer la planta. Las técnicas de secano, por ejemplo, están todas ellas orientadas a asegurar que les llegue a las plantas el máximo el agua posible, agua de lluvia que se almacena en el suelo y que, con el manejo adecuado y con las técnicas de cultivo apropiadas, se conserva para su uso posterior por el cultivo, de secano. Es muy significante que, en el secano, donde no se riega, el objetivo final de prácticamente todas las técnicas de cultivo sea la preservación del agua de lluvia.

La gestión del agua en una parcela de regadío pasa no tan solo por un manejo adecuado del sistema de riego, sino también por la planificación (elección del cultivo, sistema de plantación y formación, elección del sistema de riego, manejo del suelo, entre otros) y coordinación con el resto de las tareas (control fitosanitario, labranza del suelo, cosechas, siembras, administración, …). Adicionalmente la gestión del riego es la más complicada de todas ellas (haga el lector un repaso a todo lo que se ha descrito previamente en este capítulo, para visualizar la complejidad de un manejo excelente del riego), lo que se traduce en que sean algunas tareas de riego las que se queden en los últimos reglones de las listas de cosas a hacer. A pesar de todo ello, la tecnología actual permite que muchos de los aspectos a controlar por el agricultor se realicen de forma digital y éste esté tan solo obligado a tomar las decisiones estratégicas y trascendentes de la gestión del riego (priorizar cultivos, objetivos productivos, establecer umbrales, definir estrategias de riego deficitario -controlado o no- cuando sea necesario) y no tanto a las decisiones del día a día.

Avanzar en conocimiento y tecnología es básico para facilitar la gestión del agua, optimizar la eficiencia productiva y asegurar el máximo de alimentos para los habitantes del planeta.

A pesar de esta labor importante de los agricultores, la sociedad, ajena al mundo agro, ha desarrollado un seguido de razonamientos infundados que no ayudan en absoluto a entender la importancia del agua en la producción de alimentos y menos en el trabajo de quien los producen.

Algunas de estos razonamientos son:

- Sin agua se pueden producir alimentos
- Con una buena gestión de lo secanos podemos producir todos los alimentos que se requieren para alimentar a la sociedad
- La agricultura derrocha el agua
- El 80% de toda el agua se destina a la agricultura
- Como que somos un país seco no deberíamos regar nuestros cultivos

- El regadío acelera la desertificación del territorio.

Aunque algunos de ellos puedan contener conceptos aceptables en una parte, si bien, como se verá, no ajustados a la realidad, hay otros en que el razonamiento en su conjunto absolutamente erróneo. El primero de los razonamientos de que se analiza (Sin agua se pueden producir alimentos) es precisamente de esta categoría: Absolutamente erróneo.

3.1. Análisis de algunos razonamientos infundados

Sin agua se pueden producir alimentos

Probablemente tan solo con una comprensión rápida de las Figuras 1 y 2 de este capítulo sería suficiente para entender que este razonamiento es absolutamente infundado, las proyecciones de las funciones de producción a nula transpiración (ya sea absoluta como la de la Figura 1, o relativa como la de la Figura 2) resultan en nula producción. Si no hay transpiración los estomas cierran y no entra CO_2, básico para la fotosíntesis, pero además sin agua, el transporte de asimilados (Kramer y Boyer, 1995), las reacciones bio-químicas que se producen a diferentes niveles en la planta (Salisbury y Ross, 1992) y que requieren de un medio acuoso, o los procesos de crecimiento y turgencia de las plantas (Hsiao *et al*., 1976), para citar algunos casos donde el agua es imprescindible, serían imposibles de realizar. Y no se debe omitir la trascendente función de refrigeración que ejerce la transpiración en la temperatura de la hoja (Gates, 1964)

Que en los secanos o en zonas húmedas se produzcan alimentos sin aportaciones adicionales de riego, no significa que se puedan producir sin agua. En los secanos áridos las aportaciones de agua de lluvia, aunque insuficientes para una plena producción, son suficientes para mantener una producción mínima que se ubica en las partes bajas de las funciones de producción, y que por consiguiente responde al concepto de linealidad entre la producción final y las disponibilidades de agua. En las zonas húmedas, donde se obtienen muy buenas producciones sin aportes de riego, es porque los requerimientos de agua de estos cultivos están disponibles para las plantas de forma natural, en la inmensa mayoría de casos por las lluvias. No obstante, estas zonas húmedas se están reduciendo debido al cambio climático y, consecuentemente, la introducción del riego es una necesidad imperiosa, como ya sucede en las regiones del norte de Europa (McNamara *et al*., 2024; Riediger *et al*., 2014)

Con una buena gestión de lo secanos podemos producir todos los alimentos que se requieren para alimentar a la sociedad

Aunque a nivel mundial la agricultura de regadío ocupa en la actualidad un 16% de las tierras cultivadas y produce 40% de los alimentos (FAO, 2024), en el caso de España el regadío ocupa un 22.85% de la superficie cultivada y es responsable del 65% de la producción final de alimentos (MAPA, 2024). Las diferencias entre las dos realidades se basan en las características de las tierras de no regadío, mientras que a nivel mundial el no regadío ocupa amplias zonas con elevadas pluviometrías, en el caso de España la gran mayoría de tierras de no regadío presentan unos niveles de precipitación inferiores o muy inferiores a los requeridos para obtener una buena producción. En definitiva, en España se puede considerar que existe agricultura de secano, mientras que a nivel mundial muchas de las zonas no regadas disfrutan de pluviometrías más ajustadas a los requerimientos hídricos de los cultivos.

La capacidad de producir alimentos en España podría estar cerca de 95% de la demanda, y si eliminásemos el regadío pasaríamos a producir como mucho un 45% de los que se produce en la actualidad, lo que representaría una autosuficiencia del 43%. Imposible alimentar a todo el país con los secanos, aun cuando se introdujeran los mejores sistemas de manejo.

En realidad, estos números podrían ser mucho más negativos porqué el 43% de autosuficiencia se ha determinado estimando que se mantendría la misma superficie agrícola y que las producciones de estas plantaciones en secano serían equivalentes a las de secano actual. Aun así, esta premisa sería muy difícil de mantener porque gran parte de las tierras de regadío se encuentran en zonas que pueden ser más áridas que los actuales secanos, por lo que sería razonable aceptar que la producción bajase mucho más y la producción final podría representar menos del 38% de la demanda alimenticia en España. Si adicionalmente la superficie agrícola también se redujese porque donde hoy hay regadío pudiese ser inviable un secano los números podrían ser aún más negativos.

La agricultura derrocha el agua

La agricultura requiere transpirar unos volúmenes muy importantes de agua para producir los alimentos, además de producir otros bienes no alimenticios que tienen un interés de primer orden (el caso del algodón es probablemente una referencia de cultivo no destinado directamente a la alimentación, pero que tiene una importancia estratégica en nuestra sociedad). Aunque no toda el agua que se aplica por riego es absorbida por los cultivos (Figura 5): la percolación, la escorrentía y la evaporación directa desde el suelo pueden ser otros destinos del agua, ninguna de estas aguas se pierde. Empezando por el agua que transpiran las plantas, que suele representar más del 98% del agua absorbida por las raíces y que, en algunos casos, como en el cultivo del almendro, puede representar el 99.7%. El agua que transpiran las plantas vuelve a la atmósfera en forma de vapor de agua y por consiguiente entra a formar parte nuevamente del ciclo de agua (Agua en la atmósfera -> Nubes –> Lluvia –> Agua en los suelos, ríos y mares -> Evaporación y Agua en la atmósfera). El agua que percola en profundidad alimenta a los acuíferos o incrementa la humedad del suelo. El agua de escorrentía va a parar a otros campos, drenajes, acequias, que hacen circular el agua a otros lugares. El agua que se evapora vuelve igualmente a la atmósfera y entra de nuevo en el ciclo del agua, al igual que también lo hacen el agua de escorrentía y percolación. En este sentido ninguna agua desaparece, sino que sigue su ciclo natural. Está claro, que se utilice como se utilice el agua no hay un derroche porqué el agua no se pierde ni se esfuma, vuelve al ciclo normal de este recurso. También es verdad que en aquellos casos en que el recurso es escaso (situación de la mayoría de los regadíos españoles y que probablemente se acentuará en futuro no muy lejano como consecuencia del cambio climático), el agua que no absorben las raíces es agua no productiva, y sí que en este sentido habrá que poner énfasis en mejorar la eficiencia.

El 80% de toda el agua se destina a la agricultura

De forma genérica se postula que el agua que usa la agricultura podría ser el 70-80% del agua de un territorio (World-Bank, 2017). En el caso de Catalunya se estima que la agricultura utiliza un 70% del recurso agua (ACA, 2024), aunque en realidad se trate del 70% de los usos consuntivos (agricultura, industria, ciudades), pero no del total de agua. En el caso de Catalunya los usos consuntivos podrían ser del orden del 10% del agua total del territorio (ríos,

manantiales, evapotranspiración y evaporación natural de bosques, suelos de diferentes tipologías, etc) (Girona *et al*., 2017), y dentro de este rango podría suceder en otras demarcaciones, por lo que la demanda de agua para riego podría situarse alrededor del 7% (valor puramente indicativo, pero que nos refleja un orden de magnitud) del recurso agua en los diferentes territorios.

La agricultura no derrocha el agua, pero sí que es verdad que se deberán hacer esfuerzos para ser mucho más eficientes, aplicando conocimiento, tecnología, desarrollando buenas gobernanzas, si queremos que el planeta disponga de suficientes alimentos en las próximas décadas.

Como que somos un país seco no deberíamos regar nuestros cultivos

Precisamente porqué somos un país seco debemos regar nuestros cultivos, sí fuésemos un país húmedo con suficiente precipitación para suministrar el agua que requieren los cultivos, no sería necesario regar. Además de regar para producir alimentos, el mantener una actividad agraria da vida a los territorios y permite una actividad económica importante que representa el 13,1% del VAB en España (Cámara de Comercio de España, 2024).

Como que somos un país seco debemos prestar muchísima atención al recurso agua, y destinarla a aquellos usos que tengan una importancia vital para el planeta y la gente, y evidentemente disponer de alimentos los es.

El regadío acelera la desertificación del territorio

El regadío permite en primer lugar que haya personas que se dediquen a la agricultura en zonas donde si no hubiese regadío estarían prácticamente abandonadas por la aridez del clima. No obstante, una mala o inadecuada gestión del riego y del manejo del suelo pueden inducir en pérdidas importantes de suelo, siendo la erosión un importante factor de desertificación. Es por ello que adicionalmente a regar hay que cuidar de forma muy importante el suelo (tanto el físico, como el biológico que es la base de su fertilidad). Es evidente que un regadío descontrolado, con una mala gestión del suelo, sin prever estrategias de retención del agua de lluvia (cubiertas vegetales o terrazas en zonas de fuertes pendientes) se pueden producir daños importantes en el sistema productivo, pero precisamente un manejo adecuado y ajustado del riego que permita disponer de vegetación que fije el suelo, que aumente la materia orgánica del suelo y mantenga una refrigeración del sistema, va a ser siempre más positivo que zonas abandonadas por la población, sin ningún tipo de cuidado y con una vegetación limitada o muy limitada a causa de la aridez de nuestro clima.

Bibliografía

ACA (2024). Agencia Catalana de l'Aigua. Distribució dels consums d'aigua en relació al territori i la població. https://aca.gencat.cat/web/.content/20_Aigua/07_usos_de_laigua/01_demanda/01-mapa-distribucio-poblacio-recursoshidrics.png

Alegre, S.; Marsal, J; Tovar, M.J.; Mata, M.; Arbonés, A.; Girona, J. (2002). Regulated Deficit Irrigation in olive trees (Olea Europaea cv. Arbequina) For oil production. Acta Horticulturae 586: 259-262

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper no 56, 300 pp

Allen, R.G., Tasumi, M., Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Model. J. Irrig. Drain. Eng.-Asce. 133, 380–394.

Anderson, R.G., Girona, J., Gucci, R. (2023). Using water for best product quality in fruit and nut trees and vines. IRRIGATION SCIENCE 41(4):449-452. https://doi.org/10.1007/s00271-023-00857-8

Ayars J.E., Johnson R.S., Phene C.J., Trout T.J., Clark D.A., Mead R.M. (2003). Water use by drip-irrigated late-season peaches. Irrig Sci 22:187–194

Bailey-Serres, J., Parker, J. E., Ainsworth, E. A., Oldroyd, G. E. D., Schroeder, J. I. (2019) «Genetic strategies for improving crop yields». Nature [en línia], vol. 575, p. 109-118. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1679-0

Bellvert, J., Pamies-Sans, M., Quintana-Seguí, P., Casadesús, J. (2024). Analysis and forecast of crop water demand in irrigation districts across the eastern part of the Ebro river basin (Catalonia, Spain): estimation of evapotranspiration through Copernicus-based inputs. Irrig. Sci.

Bellvert, J., Pelechá, A., Pamies-Sans, M., Virgili, J., Torres, M., Casadesús, J. (2023). Assimilation of Sentinel-2 Biophysical Variables into a Digital Twin for the Automated Irrigation Scheduling of a Vineyard. Water 2023, 15, 2506. https://doi.org/10.3390/w15142506

Bellvert, J., Zarco-Tejada, P.J., Marsal, J., Girona, J., Gonzalez-Dugo, V., Fereres, E. (2016). Vineyard irrigation scheduling based on airborne termal imagery and water potential thresholds. AUSTRALIAN JOURNAL OF GRAPE AND WINE RESEARCH 22(2):307-315.

Bos, M.G., Kselik, R.A.L., Allen. R.G., Molden, D.J., 2008. Water Requirements for Irrigation and the Environment. Springer, Dordrecht, ISBN 978-1-4020-8947-3

Cámara de Comercio de España. (2024). Impacto del sector agroalimentario en la economía española. Informe completo Marzo, 2024. 52 pp.

Casadesus, J., Mata, M., Marsal, J., Girona, J. (2012). A general algorithm for automated scheduling of drip irrigation in tree crops. Computers and Electronics in Agriculture, 83, 11–20. https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.005

Casadesús, J., Mata, M., Marsal, J., Girona, J. (2011). Automated irrigation of apple trees based on measurements of light interception by the canopy. BIOSYSTEMS ENGINEERING 108(3): 220-226.

Domínguez-Niño, J.M., Oliver-Manera, J., Girona, J., Casadesús, J. (2020). Differential irrigation scheduling by an automated algorithm of water balance tuned by capacitance-type soil moisture sensors. AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT 228. DOI: 10.1016/j.agwat.2019.105880.

Dong, Y., Kelley, L., Miller, S.A. (2020). Efficient Irrigation Management With Center Pivot Systems. Michigan State University – Extension. E3439. April 2020, 8 pp.

FAO (2012a). Agua para alimentos: ¿Cuanta agua para producir? www.fao.org/NR/WATER. https://www.fao.org/assets/infographics/FAO-Infographic-Virtual-Water-es.pdf

FAO (2012b). Virtual Water ¿How much water is needed? www.fao.org/NR/WATER. https://www.fao.org/assets/infographics/FAO-Infographic-Virtual-Water-en.pdf

FAO (2022). Information Note - the importance of Ukraine and the Russian Federation for global agricultural markets and the risks associated with the war in Ukraine. https://www.fao.org/3/cb9013en/cb9013en.pdf

FAO (2024). https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/water-footprint-eu-energy-consumption-2019-10-29_en

FAO (2024). Improving irrigated production. https://www.fao.org/4/Y3918E/y3918e10.htm

FAO, IFAD, UNICEF, WFP, WHO (2024). The State of Food Security and Nutrition in the World 2024 – Financing to end hunger, food insecurity and malnutrition in all its forms. Rome. https://doi.org/10.4060/cd1254en

Faria, L.C., Nörenberg, B.G., Colombo, A., Dukes, M.D., Timm, L.C., Beskow, S., Caldeira, T.L. (2019). Irrigation distribution uniformity analysis on a lateral-move irrigation system. Irrig Sci 37, 195–206 (2019). https://doi.org/10.1007/s00271-019-00619-5

Fereres, E., Martinich, D.A., Aldrich, T.M., Castel, J.R., Holzapfel, E., Schulbach, H. (1982). Drip irrigation saves money in young almond orchards. Calif Agric 36:12–13

Fereres, E., Evans, R.G. (2006). Irrigation of fruit trees and vines: an introduction. Irrig Sci 24:55–57. https://doi.org/10.1007/s00271-005-0019-3

Fereres, E., Soriano, M.A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use, Journal of Experimental Botany, Volume 58, Issue 2, January 2007, Pages 147–159, https://doi.org/10.1093/jxb/erl165

Gates, D. (1964). Leaf Temperature and Transpiration. Agron. J. 56:273-277.

Girona, J. (2024). Irrigation Almond Requirements. (manuscript).

Girona, J., Behboudian, M.H., Mata, M., Del Campo, J., Marsal. (2010). Exploring six reduced irrigation options under water shortage for 'Golden Smoothee' apple: Responses of yield components over three years. AGRICULTURAL WATER MANAGEMENT 98(2): 370-375.

Girona, J., Del Campo, J., Mata, M., Lopez, G., Marsal, J. (2011). A comparative study of apple and pear tree water consumption measured with two weighing lysimeters. IRRIGATION SCIENCE 29(1): 55-63.

Girona, J., Mata, M., Arbonés, A., Alegre, S., Rufat, J., Marsal, J. (2003). Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. JOURNAL OF THE AMERICAN SOCIETY FOR HORTICULTURAL SCIENCE 128(3): 432-440.

Girona, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., Bartra, E., Marsal, J. (2006). The use of midday leaf water potential for scheduling deficit irrigation in vineyards. IRRIGATION SCIENCE 24(2): 115-127.

Girona, J., Mata, M., Fereres, E., Goldhamer, D.A., Cohen, M. (2002). Evapotranspiration and soil water dynamics of peach trees under water deficits. Agric. Water Manage., 54 (2002), pp. 107-122

Girona, J., Mata, M., Goldhamer, D.A., Johnson, R.S., DeJong, T.M. (1993). Patterns of soil and tree water status and leaf functioning during regualted déficit irrigation scheduling in peach. Journal of the American Society for Horticultural Science 118(5):580-586.

Girona, J., Villar, J.M. (2021). Aigua i producció d'aliments. Per què els cultius necessiten aigua? Quaderns Agraris (Institució Catalana d'Estudis Agraris), núm. 50 (juny 2021), p. 59-85. ISSN: 0213-0319 · e-ISSN: 2013-9780. http://revistes.iec.cat/index.php/QA DOI: 10.2436/20.1503.01.123

Girona, J., Casadesús, J., Mata, M., Del Campo, J., Arbonés, A., López, G., Rufat, J., Marsal, J. (2012). Eficiencia productiva del agua en función de la tecnología y el conocimiento aplicados al manejo del riego en diferentes cultivos. Congreso Agricultura, Agua y Energía: Ciencia, Tecnología, Política y Planificación del Agua y de la Energía en los Regadíos. Aspectos Socioeconómicos y Ambientales. Madrid 11 y 12 de mayo de 2011.

Girona, J., Ibañez, C., Savé, R. (2017). Visió IRTA sobre la gestió de l'Aigua a Catalunya. Apunts per una gestió global eficiente. Visió IRTA nº 1. 13 pp. https://www.irta.cat/wp-content/uploads/2018/03/Aigua_v3.pdf

Guzinski, R., Nieto, H., Sandholt, I., Karamitilios, G. (2020). Modelling High-Resolution Actual Evapotranspiration through Sentinel-2 and Sentinel-3 Data Fusion. Remote Sensing. 12, 9, 1433.

Hanks, R. J. (1974). A model for predicting plant yield as influenced by water use. Agronomy Journal. 66(5), 660-664. http://dx.doi.org/10.2134/agronj1974.00021962006600050017x

Hanks, R.J. (1983). «Yield and water-use relationships: An overview». A: Taylor, H. M.; Jordan, W. R.; Sinclair, T. R. (ed.). Limitations to efficient water use in crop production. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy, Inc.: Crop Science Society of America, Inc.: Soil Science Society of America, Inc., p. 393-411.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: water use by people as a function of their consumption pattern, Water Resour. Manag., 21(1), 35–48, 2007.

Hoekstra, A. Y., Chapagain, A. K. (2008). Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources, Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2008.

Hsiao, T., Acevedo, E., Fereres, E., Henderson, D. (1976). Water Stress, Growth, and Osmotic Adjustment. Philosophical Transactions of The Royal Society B: Biological Sciences. 273. 479-500. 10.1098/rstb.1976.0026.

IPPC, 2023. CLIMATE CHANGE (2023). Synthesis Report. Summary for Policymakers, 42 pp.

Katz, Livia & Ben-Gal, Alon & Litaor, Michael & Naor, Amos & Peres, M. & Peeters, Aviva & Alchanatis, Victor & Cohen, Y. (2022). A spatiotemporal decision support protocol based on thermal imagery for variable rate drip irrigation of a peach orchard. Irrigation Science. 41. 1-19. 10.1007/s00271-022-00830-x.

Kramer, P. J., Boyer, J. S. (1995). Water Relations of Plants and Soils. New York, NY: Academic Press, 1995.

MAPA (2024). El regadío en España. https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/regadio-espanya/

McNamara, I., Flörke, M., Uschan, T., Baez-Villanueva, O.M., Herrmann, F. (2024). Estimates of irrigation requirements throughout Germany under varying climatic conditions. Agricultural Water Management, Volume 291, ISSN 0378-3774, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108641

Mekonnen, M.M., Hoekstra, A.Y. (2011). The green, blue and grey water footprint of crops and derived crop. Products. Hydrol. Earth Syst. Sci., 15, 1577–1600, 201. www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/1577/2011/ . doi:10.5194/hess-15-1577-2011

OECC (2022). Cambio Climático: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad. Guía Resumida del Sexto Informe de Evaluacióndel IPCC. Grupo de Trabajo II. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Madrid. Basado en materiales contenidos en el IPCC AR6 Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability.

ONU (2024). https://www.un.org/en/global-issues/population (consultado el 12/09/2024)

Phogat, V., Skewes, M.A., McCarthy, M.G., Cox, J.W., Šimůnek, J., Petrie, P.R. (2017).Evaluation of crop coefficients, water productivity, and water balance components for wine grapes irrigated at different deficit levels by a sub-surface drip. Agric. Water Manage., 180 (Part A) (2017), pp. 22-34

Riediger, J., Breckling, B., Nuske, R.S., Schröder, W. (2014). Will climate change increase irrigation requirements in agriculture of Central Europe? A simulation study for Northern Germany. Environ Sci Eur 26, 18 https://doi.org/10.1186/s12302-014-0018-1

Salisbury, F.B., Ross C.W. (1992). Plant physiology (4th Ed.). Wadsworth, Belmont, California, p.184.

Smith, R.J., Raine, S.R, Minkevich, J. (2005). Irrigation application efficiency and deep drainage potential under surface irrigated cotton. Agricultural Water Management 71 (2005) 117–130

Steduto, T. C., Hsiao, E., Fereres., Raes, D. (2012). Crop Yield Response to Water. FAO Irrigation and Drainage Paper 66. By P. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 500, ISBN 978-92-5-107274-5.

WFP-N (2024). https://www.waterfootprint.org/resources/interactive-tools/product-gallery/

World-Bank (2017). World Bank Blogs. Water and Agriculture. https://blogs.worldbank.org/en/opendata/chart-globally-70-freshwater-used-agriculture

Worldmeters (2024). https://www.worldometers.info/world-population/ (consultado el 12/09/2024)

cajamar
CAJA RURAL

CAJAMAR INNOVA

AGUA

AHORRO Y GESTIÓN SOSTENIBLE

MEJORA EL USO DEL AGUA Y HAZ TU EXPLOTACIÓN MÁS SOSTENIBLE

Pregúntanos por las líneas de financiación para la optimización y mejora del uso del agua.

Escanea este código y amplía la información.

Banca Móvil

_www.cajamar.es

ADNAGRO

_www.adnagro.es

1.2. Necesidades y compatibilidad medioambiental

Ignacio Buesa, Diego S. Intrigliolo* y Ramón López-Urrea

Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE), CSIC-UV-GVA

* diego.intrigliolo@csic.es

Índice

1. El regadío y la desertificación. Compatibilizando las necesidades agronómicas y medioambientales 28

2. Eficiencia versus ahorro. Una cuestión de escala 30

3. Practicas agronómicas para reducir el uso del agua en la agricultura 32

3.1. Acolchado y otros manejos del suelo con cubiertas vegetales 32

3.2. Sombreado y aplicación de caolín 36

3.3. Diseño de la plantación (fechas de siembra y orientación de las filas) 37

3.4. Manejo de la vegetación 38

Resumen

En climas mediterráneos semiáridos, el agua es el principal factor limitante de la funcionalidad de los ecosistemas naturales y agrícolas. Los escenarios futuros de cambio climático prevén eventos de lluvia cada vez más erráticos y extremos, olas de calor, un aumento de la demanda evaporativa y una disminución de los recursos hídricos disponibles. Por otra parte, el manejo del agua y los nutrientes en los sistemas agrarios afecta al ciclo de estos recursos a una escala global, debido a las conexiones hidrológicas y biofísicas existentes. Por ello, es importante estudiar el manejo y la gestión de los recursos en la agricultura de forma multidisciplinar, determinando su impacto sobre el balance hídrico a escala de cuenca hidrográfica y la disponibilidad de agua para otros servicios ecosistémicos. En España y otros países de clima mediterráneo, la agricultura de regadío consume alrededor del 75% del agua disponible. Por ello, en un contexto global de cambio climático, de escasez de recursos hídricos y competencia con otros sectores (urbano e industrial) estamos obligados a hacer un uso más eficiente y sostenible del agua en la agricultura. Es importante destacar que el riego de precisión puede incrementar la eficiencia en el uso del agua (EUA) a nivel de parcela, reduciendo la lixiviación de agua y las pérdidas por percolación profunda y consiguiente riesgo de contaminación de acuíferos. Sin embargo, a nivel de cuenca hidrográfica, esta mejora de la EUA no redunda en un ahorro de agua, ya que no se reduce su uso consuntivo. Es decir, que la ineficiencia en el uso del agua a nivel de parcela se puede recuperar en otros eslabones del balance hídrico. Por lo tanto, es necesario diseñar prácticas agronómicas que no sólo mejoren la EUA, sino que permitan reducir el uso consuntivo del agua (o evapotranspiración de los cultivos) y así minorar la presión sobre los recursos hídricos externos. En este capítulo se presentan una serie de prácticas agronómicas para reducir el uso

del agua en los agroecosistemas, como son: el uso de acolchados orgánicos e inorgánicos, el establecimiento de cubiertas vegetales; el sombreado y aplicación de caolín, el diseño de la plantación (fecha de siembra y orientación de las filas); y el manejo de la vegetación (deshojados, inclinación de la espaldera, etc.).

1. El regadío y la desertificación. Compatibilizando las necesidades agronómicas y medioambientales

En las regiones de clima mediterráneo, el agua es el principal recurso limitante de la funcionalidad tanto de los ecosistemas naturales como los agrícolas (agroecosistemas). Todo ello se debe a la marcada estacionalidad de las precipitaciones y de su escasez en relación con la demanda evaporativa del ambiente. Además, según las proyecciones de cambio climático, el clima mediterráneo parece ser especialmente vulnerable al déficit hídrico, ya que no sólo afecta a la disponibilidad de los recursos hídricos, sino que también tiende a incrementar la evapotranspiración (ET) de las plantas (Döll, 2002). Cabe destacar que el grado de fiabilidad de los modelos que pronostican aumentos de la evapotranspiración terrestre es media, pues los efectos de los cambios en la humedad relativa del aire y del incremento en el CO_2 atmosférico sobre la ET generan muchas incertidumbres. No obstante, de lo que sí hay certeza es de que en los climas mediterráneos van a incrementarse la frecuencia de fenómenos extremos como lluvias torrenciales, olas de calor, sequías, etc. (IPCC, 2021).

Por otra parte, el desarrollo rural de muchas zonas mediterráneas se fundamenta en los sistemas agrarios, que son unas de las principales actividades económicas, en particular en las zonas de interior más alejadas de la costa. Los sistemas agrarios predominan entre los distintos usos del suelo, determinando el paisaje e influyendo sobre su biodiversidad y los balances de agua, nutrientes y energía. Además, los sistemas agrarios tienen externalidades, tanto positivas como negativas, sobre el medio ambiente en el que se integran a nivel de una cuenca hidrográfica o subcuenca. De hecho, el manejo del agua y nutrientes llevado a cabo en las parcelas de cultivo influye y afecta a todo el ciclo de los recursos a una escala más global, dadas las conexiones hidrológicas y biofísicas existentes. Por tanto, es importante estudiar específicamente los aspectos de gestión y manejo del agua en los cultivos mediterráneos mediante investigaciones con un carácter multidisciplinar, para así determinar cómo el manejo de los recursos hídricos en los sistemas agrarios influye sobre el balance de agua de la cuenca hidrográfica y la disponibilidad de agua para otros servicios eco-sistémicos. La sostenibilidad de los ecosistemas mediterráneos requiere mejorar el manejo del agua en la agricultura con el objetivo de conservarla tanto cuantitativa como cualitativamente.

Desde una visión simplista, los sistemas de cultivo y en particular los de regadío, podrían considerarse como una estrategia para evitar la desertificación, dado que permiten mantener el suelo con una cubierta vegetal, disminuyendo su riesgo de erosión (Figura 1). Sin embargo, todo ello se deriva de un uso externo de los recursos (agua, fertilizantes, maquinaria, entre otros), sin los cuales no sería posible mantener esa cobertura y que, por otro lado, si están mal gestionados o sobreexplotados, pueden tener consecuencias negativas sobre el medio natural que les rodea. En regiones de clima mediterráneo, la agricultura de regadío es el principal consumidor del agua disponible. En las cuencas hidrográficas españolas representa aproximadamente el 75% del agua

que se consume. Además, en la mayoría de las cuencas hidrológicas españolas queda muy poco margen para incrementar las reservas hídricas. A nivel nacional, la sostenibilidad de un sector tan importante socio-económicamente, culturalmente, demográficamente y paisajísticamente como la agricultura, muy especialmente la de regadío, depende de manejar los recursos hídricos de forma eficiente y diseñar las plantaciones con criterios de resiliencia.

Figura 1. Dos ejemplos del mantenimiento de una cubierta vegetal verde en cultivos bajo regadío (fotos a la izquierda) frente a un espacio natural similar en el que predomina el suelo desnudo frente a la aridez del clima (fotos a la derecha).

Por tanto, dado que los sistemas agrarios son necesarios para mantener la actividad económica y la provisión de alimentos para una población mundial en continuo aumento, el objetivo último debe ser estudiar soluciones agronómicas y medioambientales que permitan garantizar la sostenibilidad (ambiental, social y económica) de los sistemas agrarios en el marco de una estrategia de intensificación sostenible. En este contexto, se hace necesario incrementar la eficiencia en el uso del agua y reducir la contaminación de los acuíferos. Prácticas agrícolas inadecuadas pueden incrementar la demanda de recursos hídricos y favorecer su contaminación y salinización, así como incrementar la degradación del suelo. Estos factores, unidos a la aridez del clima mediterráneo, la sequía, los incendios forestales, etc., son los principales factores de riesgo de desertificación en España. De hecho, amplias zonas de nuestra geografía se encuentran potencialmente afectadas por el proceso de desertificación. Concretamente, más de dos terceras partes del territorio español pertenecen a las categorías de áreas áridas, semiáridas y subhúmedas secas (Figura 2).

Los procesos de desertificación dependen, entre otros factores, de la evolución del contenido de humedad, del grado de cobertura y del estado de agregación del suelo. Todos estos factores son afectados notablemente por las prácticas agrícolas en general, y en especial el regadío. De ahí la importancia de diseñar prácticas agronómicas sostenibles para evitar la degradación del suelo y su erosión, y así reducir su vulnerabilidad ante el cambio climático; mejorar el balance hídrico y de nutrientes buscando evitar la sobreexplotación y contaminación de los recursos

hídricos. La intensificación sostenible de la agricultura se define por utilizar prácticas agrícolas que tengan en cuenta los ciclos ecológicos en el transcurso del tiempo, y permitir producir alimentos y materias primas de forma económicamente viable (Pretty y Bharucha, 2014). Esto implica, por un lado, lograr un equilibrio ecológico entre el uso de los recursos naturales y sus tasas de renovación, y por otro, hacerlo permitiendo la rentabilidad y respetando cuestiones sociales y éticas de los agricultores.

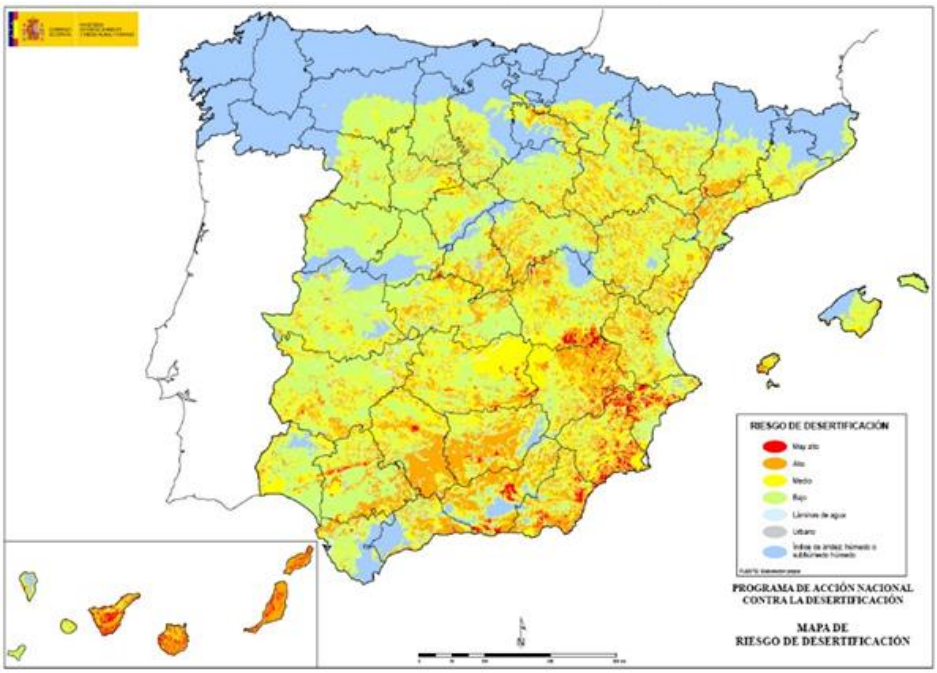


Figura 2. Mapa de riesgo de desertificación en España (Fuente: Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico)

Con estos objetivos en mente, este capítulo pretende resumir una serie de prácticas agronómicas que permitan manejar más eficientemente el agua, buscando lograr un compromiso entre satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos y las medioambientales. En este sentido, cobra especial relevancia la mejora de la eficiencia en el uso del agua (EUA) a nivel de parcela, es decir, reducir el agua empleada por los cultivos, manteniendo su productividad (Hsiao *et al.,* 2007). De esta manera se busca satisfacer la demanda de productos agrícolas y mantener el tejido socio-económico, y también preservar los recursos hídricos y, por ende, los ecosistemas.

2. Eficiencia versus ahorro. Una cuestión de escala

La gestión de los recursos hídricos se basa en un balance entre la fuente y la demanda de agua. Así pues, para llevar a cabo una correcta gestión de los recursos hídricos, es necesario tener en cuenta ambos componentes de este balance, las distintas escalas de trabajo y las posibilidades de actuación (Figura 3). En este sentido se debe tener presente el marco global de gestión del agua en una cuenca hidrográfica, teniendo en cuenta tanto las disponibilidades de agua como los límites de su uso, las productividades económicas y externalidades ambientales derivadas del empleo del agua de riego en los distintos agro-ecosistemas existentes en una determinada cuenca hidrográfica o distrito de riego.

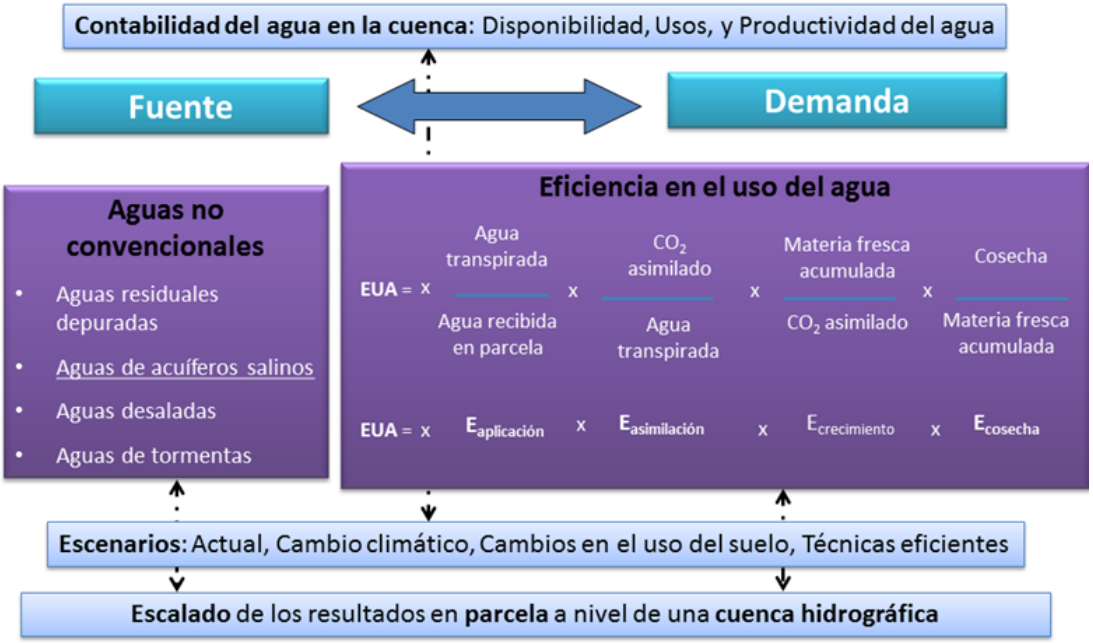


Figura 3. Esquema de los aspectos a tener en cuenta para la gestión de los recursos hídricos en la agricultura, incluyendo las actuaciones posibles para incrementar la fuente de agua disponible o para optimizar la eficiencia en el uso del agua (EUA). Se incluye una definición matemática de las variables que influyen sobre la EUA

Desde el lado de la **fuente** de agua disponible, se está realizando mucho esfuerzo para la reutilización de aguas convenientemente depuradas para el regadío. Desde luego, esta aproximación basada en el concepto de economía circular, permite aprovechar mejor los recursos hídricos e incrementar la disponibilidad de agua para la agricultura, hecho de notable importancia para las regiones más áridas y con una agricultura de regadío competitiva como puede ser por ejemplo en España la Región de Murcia o la Comunidad Valenciana. Sin embargo, no debe perderse de vista cómo el manejo del agua regenerada influye sobre el balance hídrico de una cuenca. Es decir, no debe pensarse que agua depurada y vuelta a utilizar en agricultura es un recurso "gratuito", dado que, si se le da uso en agricultura, no vuelve al medio ambiente, sobre todo en las zonas agrícolas alejadas de la cosa. Por lo tanto, las consideraciones sobre el uso del agua depurada para el regadío, habría que hacerlas teniendo en cuenta el resto de servicios eco-sistémicos y usos alternativos que podría tener el agua depurada (coste de oportunidad).

Es por ello que es necesario, continuar con los esfuerzos para actuar sobre el lado de la **demanda** de agua por los cultivos, siendo importante diferenciar entre las implicaciones que tiene la mejora en la EUA sobre el balance hídrico a nivel de cuenca y, determinar hasta qué punto los ahorros de agua a nivel de parcela puedan derivarse en ahorros netos en los agro-ecosistemas. Un incremento en la EUA en parcela mediante, por ejemplo, un riego de precisión (ver Bloque II de este libro), desde luego permitirán reducir la lixiviación de agua y las perdidas por percolación profunda, pero a nivel global, no permite reducir el uso consuntivo del agua y la ineficiencia en parcela se recupera en otros eslabones del balance hídrico. Es necesario, por lo tanto, diseñar prácticas agronómicas que permitan reducir el uso consuntivo del agua y minorar así la presión sobre los recursos externos.

3. Practicas agronómicas para reducir el uso del agua en la agricultura

Existen multitud de prácticas agronómicas para reducir el uso consuntivo del agua en la agricultura. En este capítulo vamos a desarrollar sólo algunas de ellas, poniendo el foco en sus efectos sobre el balance hídrico. Las prácticas agronómicas se pueden clasificar en: i) el manejo del suelo, buscando incrementar su capacidad de almacenamiento de agua (labranza, cubiertas vegetales, barreras anti-erosión, abancalamiento, líneas clave, biochar, etc.) o en reducir las pérdidas por evaporación (acolchados, cubiertas vegetales, etc.); ii) la modificación de la radiación interceptada por el cultivo (arquitectura del dosel vegetal, poda, deshojados, sombreado, caolín, etc.); iii) el diseño agronómico adecuado y la gestión del sistema de riego; determinar las necesidades hídricas del cultivo; las estrategias de riego deficitario, etc. (ver Bloque II de este libro). Otra estrategia para reducir el uso del agua en agricultura es el uso de cultivos, variedades y portainjertos, más tolerantes al déficit hídrico. Esta estrategia se desarrolla en el Bloque III de este libro. A este respecto, es importante tener presente que las prácticas agronómicas que se describen a continuación pueden no provocar los mismos efectos en todos los cultivos, incluso pueden depender de la variedad y el portainjerto empleado.

3.1. Acolchado y otros manejos del suelo con cubiertas vegetales

Acolchados orgánicos e inorgánicos

El acolchado es una práctica agronómica que consiste en aplicar una capa protectora a la superficie del suelo. Esta capa puede estar hecha de materiales orgánicos (como restos de poda, paja, etc.) o inorgánicos (plástico, geotextiles, grava, etc.), produciendo cambios beneficiosos en el entorno del suelo, como pueden ser mejoras en las condiciones físicas, la composición química y las actividades biológicas (Acharya *et al.*, 2005). En lo relativo a las condiciones físicas, el acolchado influye significativamente en el contenido de humedad del suelo al controlar la evaporación de agua del suelo, cambia su temperatura, facilita la condensación nocturna del agua debido a la fluctuación de la temperatura, controla la erosión y, en el caso de los acolchados no plásticos, mejora la infiltración del agua y aumenta su retención en el suelo. Por ello, el acolchado se utiliza a menudo en sistemas agrarios (secano y regadío) de regiones áridas y semiáridas con escasez de agua, debido a su potencial para mejorar la eficiencia en el uso del agua y como estrategia para ahorrar agua (Pereira *et al.,* 2009). Además, acelera el desarrollo del cultivo en climas fríos al incrementar la temperatura del suelo y ayuda al control de malas hierbas (Allen *et al.,* 1998).

Actualmente, son bien conocidos los beneficios de los acolchados orgánicos en la conservación del agua del suelo, haciendo del acolchado un componente fundamental de la agricultura de conservación (Kassam *et al.,* 2013). Los acolchados orgánicos actúan como barrera a la escorrentía e interceptan las gotas de lluvia, protegiendo el suelo de salpicaduras, desprendimiento de partículas y obstrucción de los poros superficiales del suelo, contribuyendo así a minimizar su erosión (Prosdocimi *et al.,* 2016). Además, pueden aumentar la macroporosidad de los agregados estructurales del suelo, lo que mejora la infiltración del agua y aumenta su capacidad de almacenamiento (Kahlon *et al.,* 2013). Por otra parte, reducen la componente evaporativa a través de una menor exposición de la superficie del suelo a la radiación solar y una mayor resistencia a la pérdida de vapor de agua a la atmósfera. Sin embargo, la eficacia de los acolchados orgánicos depende en gran medida de su grosor y

composición (Figura 4). Una capa de acolchado más gruesa produce efectos más significativos (Acharya *et al.*, 2005).

Los acolchados inorgánicos de plástico están hechos principalmente de polietileno (Kasirajan y Ngouajio, 2012). Estas láminas se colocan normalmente sobre la superficie del suelo, especialmente a lo largo de las hileras de plantas, con agujeros según la distancia entre plantas para permitir que estas emerjan. La eficacia del acolchado plástico depende en gran medida del color del material, que puede ser transparente, blanco o negro. El color influye significativamente en el albedo, influyendo en la energía disponible en la superficie y en la temperatura del suelo de diferentes maneras (Acharya *et al.,* 2005). Se crea un microclima alrededor de la planta al modificar el balance de radiación en superficie y, por tanto, el balance energético, lo que puede contribuir a aumentar el rendimiento de los cultivos. Las propiedades físicas de los suelos apenas se ven afectadas, ya que el suelo puede seguir siendo perturbado regularmente por el laboreo, pero los cambios en el contenido de humedad del suelo son evidentes, ya que la película de plástico actúa como una barrera, impidiendo la evaporación del agua del suelo y aumentando la disponibilidad de humedad en la zona radicular (Somanathan *et al.,* 2022).

Por lo tanto, es evidente que los acolchados orgánicos e inorgánicos tienen un impacto significativo reduciendo la evaporación de agua del suelo, especialmente durante las primeras fases de desarrollo del cultivo, cuando la cubierta vegetal es todavía pequeña y sólo cubre parcialmente el suelo (Ramos *et al.,* 2024). Por ejemplo, López-Urrea *et al.* (2020) analizaron el efecto de utilizar un acolchado orgánico del suelo (restos de poda) sobre la evapotranspiración (ET) de un viñedo. Para ello, diferenciaron tres prácticas de manejo, un suelo desnudo, un acolchado orgánico con restos de poda (de unos 5 cm de grosor) y un acolchado inorgánico con una lona de plástico de color similar al del suelo. En las mismas condiciones de demanda evaporativa y de fracción de cobertura del suelo, los resultados mostraron que el acolchado orgánico redujo la ET del cultivo entre un 16-18%, mientras que el plástico la redujo entre un 24-30%. Estos autores concluyeron que el uso de restos de poda como acolchado orgánico podría ser una alternativa respetuosa con el medio ambiente para reducir la evaporación de agua del suelo y aumentar la productividad del agua de los cultivos en amplias zonas en las que los viñedos se riegan por goteo. Por otra parte, Allen *et al.* (1998) indicaron que la reducción en la evaporación de agua desde el suelo suele llevar asociado un aumento de la transpiración por la planta debido a la transferencia de calor sensible y radiativo desde la superficie del plástico a la vegetación adyacente. Sin embargo, aunque la tasa de transpiración de un cultivo con acolchado de plástico puede aumentar una media del 10-30% durante su ciclo comparado con un suelo desnudo, la ET total se reduce de media un 10-30% debido a una reducción de la evaporación de entre el 50% y el 80%. Estos incrementos en el agua disponible en el suelo para los cultivos pueden mejorar su estado hídrico, lo que resulta fundamental en climas mediterráneos y semiáridos. Por ejemplo, en un viñedo de Requena, Valencia (Figura 4), se observó una mejora del estado hídrico de las cepas cuando se cubría la totalidad del suelo con una capa de restos de poda triturados de 3-5 cm en comparación al suelo desnudo (Buesa *et al.*, 2021).

Figura 4. Viñedo de la variedad Bobal con aplicación de acolchado orgánico a base de restos de poda triturados

Cubiertas vegetales naturales y cultivadas

El agua debe considerarse un componente limitante en las decisiones sobre el uso del suelo para que la agricultura de regadío sea sostenible; sin embargo, las implicaciones hídricas de muchas prácticas agrícolas sostenibles son limitadas a escala de cuenca hidrográfica (Iglesias y Garrote, 2015). En zonas áridas y semiáridas, la falta de estos conocimientos podría conducir a una baja adopción de estas prácticas, como son el uso de cubiertas vegetales (una amplia variedad de plantas que incluye hierbas autóctonas espontáneas o mezclas de gramíneas anuales y leguminosas cultivadas), ya que han surgido como una práctica de gestión sostenible, impulsada recientemente por los Planes Estratégicos de la Política Agraria Comunitaria (PAC). No obstante, existen muchas incertidumbres sobre el agua necesaria para establecer y mantener estas cubiertas, y los costes asociados a las mismas. Los agricultores esperan que la cubierta vegetal aporte beneficios, pero carecen de información específica para determinar si la huella hídrica potencial compensa los costes operativos y los posibles obstáculos asociados a esta práctica (DeVincentis *et al.*, 2020).

Las cubiertas vegetales pueden afectar al balance hídrico del suelo a corto plazo, a través de la mejora de la infiltración y la captación de las precipitaciones, el control de la erosión, los cambios en las pérdidas debidas a la evapotranspiración real de los cultivos, la captación del rocío y el enfriamiento del suelo; o a largo plazo, a través del aumento del contenido de materia orgánica que mejora la dinámica suelo-agua (García-Díaz *et al.,* 2018; Tautges *et al.,* 2019; Pappalardo *et al.,* 2019).

Algunos estudios recientes muestran efectos positivos de las cubiertas vegetales permanente o fuera del ciclo de cultivo en viñedos regados deficitariamente. Por ejemplo, los cultivos de cobertura permanentes y las técnicas de labranza cero fueron utilizados en viñedos adultos de la variedad Merlot regados con déficit en California, con escaso impacto inmediato en la productividad de la uva (Steenwerth *et al.,* 2013). Además, en viñedos de regadío localizados en zonas mediterráneas semiáridas, los cultivos de cobertura mejoran el crecimiento de las raíces finas de la vid (mayor densidad de raíces) (Linares-Torres *et al.,* 2018); ya que las cubiertas obligan al sistema radicular de la vid, principalmente a sus raíces más delgadas, a buscar agua

en compartimentos del suelo cada vez más profundos (Tomaz *et al.,* 2017). Las cubiertas vegetales extraen agua y nutrientes del suelo y, por tanto, reducen el vigor vegetativo de la vid y también pueden mejorar la calidad de la uva y las características sensoriales de los vinos en regiones húmedas (Trigo-Córdoba *et al.*, 2015). Sin embargo, en viñedos de bajo vigor vegetativo y con estrategias de riego muy deficitario en zonas áridas, la combinación de cubiertas vegetales permanentes con tratamientos de riego deficitario debe considerarse cuidadosamente, ya que puede reducir el rendimiento sin ningún beneficio para la calidad de la uva (Tomaz *et al.,* 2021).

Recientemente, en un estudio llevado a cabo en California sobre el impacto del uso de cubiertas durante el invierno en la humedad del suelo y la ET del tomate y el almendro, sugirió que los agricultores pueden favorecerse de los beneficios para la salud del suelo asociados a estas cubiertas de invierno, con un uso mínimo de agua por las mismas, y sin tener que cambiar los programas de riego de primavera-verano y las decisiones de gestión del agua (DeVincentis *et al.,* 2022). Sin embargo, en un estudio en un agroecosistema de almendros jóvenes en Hellín, Albacete (Figura 5), se observó que las cubiertas vegetales sembradas con mezclas de gramíneas y leguminosas competían con los árboles por los recursos nutricionales del suelo, reduciendo su vigor y productividad (Rubio-Asensio *et al.,* 2022).

Figura 5. Plantación de almendros jóvenes var. Belona con cubiertas vegetales sembradas con mezclas de gramíneas y leguminosas

En definitiva, actualmente existe cierta controversia en los efectos del uso cubiertas vegetales sobre la respuesta agronómica de los agroecosistemas mediterráneos. Hasta donde sabemos, faltan estudios más robustos centrados en el impacto de estas cubiertas sobre los balances hídricos y energéticos, y sus implicaciones sobre parámetros de producción y calidad en las plantaciones de árboles frutales y los viñedos, en condiciones de escasez de agua. Hasta la fecha, los estudios realizados han analizado los efectos finales de estas cubiertas sobre la productividad de la plantación (Morugan-Coronado *et al.* 2020), pero sin intentar relacionar cuantitativamente esos resultados con los balances de energía y agua. Este es un paso crítico para entender las implicaciones relacionadas con el uso del agua por las cubiertas vegetales, y las barreras para la

adopción de esta práctica agrícola sostenible en sistemas de regadío de zonas áridas y semiáridas.

3.2. Sombreado y aplicación de caolín

Sombreado

Una práctica agronómica muy empleada en cultivos como los cítricos, la uva de mesa, los frutales de hueso y de pepita, etc. es el sombreado de las plantas mediante mallas semitransparentes (Figura 6). Estas mallas permiten reducir la radiación incidente y el viento sobre el cultivo, disminuyendo la temperatura del dosel vegetal y los frutos, y reduciendo su ET. Esto, a su vez, favorece al estado hídrico del cultivo, incrementa la concentración de clorofila en las hojas y reduce su estrés térmico, lo que puede tener efectos positivos sobre la composición de la fruta (Caravia *et al.*, 2016; Martínez-Lüscher *et al.,* 2020; Buesa *et al.,* 2023). No obstante, el sombreado de las hojas también puede reducir la capacidad de fotosíntesis del cultivo, por lo que el porcentaje de radiación interceptada por la malla ha de ajustarse a las necesidades del cultivo. En algunos estudios se observó un retraso en las tasas de maduración del fruto por efecto del sombreado (Caravia *et al.,* 2016).

Figura 6. Plantación de manzanos 'Royal Gala' en seto bajo malla de sombreo

En resumen, el sombreado de la vegetación resulta ser una técnica agronómica interesante para la adaptación a los efectos negativos del cambio climático, permitiendo reducir el estrés térmico y aliviar el estrés hídrico de los cultivos, retrasando el proceso de maduración. No obstante, el elevado coste de instalación de esta técnica cuestiona su aplicación en los cultivos menos rentables.

Aplicación de caolín

El caolín es un mineral tipo silicato estratificado ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) que pulverizado sobre el dosel vegetal crea una película que incrementa el reflejo de la radiación solar y, por tanto, reduce la radiación interceptada por el cultivo, disminuyendo su temperatura y mitigando el posible estrés térmico (Glenn y Puterka, 2005). Esto ayuda a proteger a las hojas de los daños causados por el

exceso de radiación solar, especialmente en áreas con altas temperaturas y radiación solar intensa (Figura 7). No obstante, algunos autores también han reportado descensos en la capacidad fotosintética del cultivo, aunque sin afectar a su productividad (Shellie y King, 2013). Además, la aplicación de caolín sobre las hojas también puede reducir la pérdida de agua por transpiración. Esto puede ayudar a conservar la humedad del suelo y mejorar la eficiencia en el uso del agua por parte de las plantas, especialmente en condiciones de sequía o estrés hídrico. Por otra parte, el caolín puede actuar como una barrera física que dificulta la alimentación y la oviposición de insectos plaga, así como la propagación de enfermedades fúngicas.

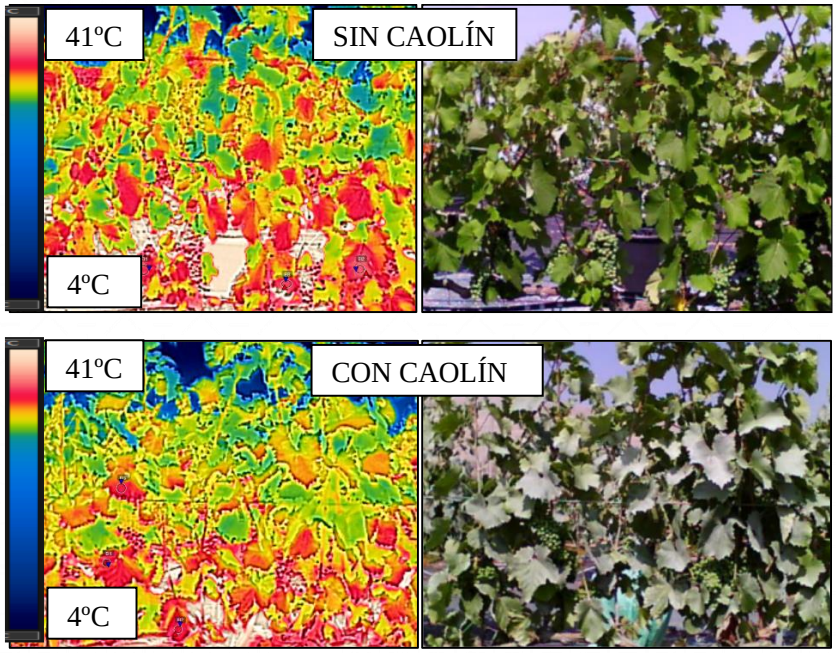


Figura 7. Comparativa de los efectos del caolín aplicado en un viñedo de 'Monastrell' sobre la termografía del dosel vegetal

En resumen, el caolín puede proporcionar varios beneficios a los cultivos, incluida la protección contra el estrés térmico, la reducción de la transpiración y la prevención de plagas y enfermedades. Por tanto, en un contexto de cambio climático, esta técnica puede ser eficaz para adaptar la agricultura mediterránea a la escasez de recursos hídricos, mitigando sus efectos sobre la productividad de los cultivos. Sin embargo, es importante tener en cuenta que su eficacia puede variar dependiendo de factores como la dosis de aplicación, el tipo de cultivo y las condiciones ambientales locales.

3.3. Diseño de la plantación (fechas de siembra y orientación de las filas)

La productividad y el consumo de agua de las plantaciones dependen en gran medida de la cantidad de radiación solar que intercepta el dosel vegetal. En cultivos con un grado de cobertura vegetal del suelo inferior al 100%, la luz capturada por la vegetación depende tanto del desarrollo vegetativo como del sistema de conducción y del diseño de las plantaciones. Por otro lado, la respuesta fisiológica de las plantas, en particular la regulación estomática, se ve influenciada también por las condiciones ambientales, repercutiendo de forma directa en el intercambio gaseoso. A escala temporal diaria, el nivel de fotosíntesis, la transpiración y, por lo tanto, la eficiencia en el uso del agua intrínseca, no solo son función del nivel de radiación interceptada sino también del momento del día en el que dicho nivel se alcanza. Por ejemplo,

Corelli-Grapadelli (2003) demostró que la fotosíntesis de todo el árbol de manzano era menor por la tarde que por la mañana, a pesar de que los niveles de radiación interceptada en esos momentos eran iguales. Esto es debido a que, en general, en las horas centrales del día y durante la tarde, la temperatura y el déficit de presión de vapor del aire son mayores que por la mañana, lo que tiene un efecto directo sobre la tasa de transpiración de agua en las hojas. Así pues, al contrario de lo que ocurre con cultivos bajos y tupidos, como en el caso del césped, alrededor del dosel vegetal de los viñedos y frutales es menos probable que se formen espesas capas límites de aire que puedan almacenar el agua transpirada por las hojas (Jarvis, 1985).

Para el caso de viñedos en espaldera se ha demostrado que es posible reducir el consumo de agua e incrementar la EUA orientando las filas del viñedo en dirección este-oeste, frente a norte-sur (Buesa *et al.*, 2020a). De hecho, la transpiración de las cepas, relativa al área foliar, fue un 16% menor en las filas del viñedo con orientación este-oeste sin ningún efecto negativo sobre la productividad de las cepas. Esta reducción es debida a que en latitudes de los climas mediterráneos la intercepción de la radiación solar tiende a maximizarse en las hileras de cultivo orientadas en dirección norte-sur y a minimizarse en la este-oeste (Campos *et al.,* 2017).

Por otra parte, en cultivos herbáceos anuales es posible reducir el uso del agua modificando las fechas de siembra para evitar los periodos más cálidos (Sadras y McDonald, 2012), en los que el déficit de presión de vapor del aire (DPV) es mayor y, por lo tanto, en los que la asimilación de carbono mediante la fotosíntesis por mol de agua transpirada es menor debido a la elevada temperatura y DPV.

3.4. Manejo de la vegetación

En climas mediterráneos semiáridos, el factor más limitante para el desarrollo de las plantas es el agua, y, por el contrario, la radiación suele ser excedentaria. El consumo de agua de los cultivos está muy relacionado con la radiación solar que intercepta (Williams and Ayars, 2005; Losciale *et al.,* 2010). Esta radiación interceptada por las plantas viene determinada por las propiedades del dosel y su geometría. Es por ello, que el manejo de la vegetación puede ser una práctica de cultivo eficaz en reducir la cantidad de radiación interceptada por el cultivo y reducir así su ET y/o reducir el estrés hídrico de las plantas, logrando así optimizar el uso de los recursos hídricos disponibles. De hecho, tanto el estrés hídrico como el térmico pueden aliviarse regulando la luz solar interceptada por los cultivos.

En este sentido, realizar podas selectivas de las plantas puede ayudar a controlar un excesivo vigor y a dirigir los fotoasimilados hacia las partes productivas, lo que puede reducir la demanda de agua de las plantas al disminuir la transpiración, y mejorar la EUA. Por ejemplo, Santesteban *et al.* (2017) indicaron que un despunte severo de los sarmientos de la vid mejoraba el estado hídrico del viñedo y fomentaba el crecimiento de los brotes secundarios, provocando además un retraso en la maduración de la uva. Este retraso en la maduración de la uva es un efecto deseado ante los adelantos en la fecha de vendimia provocados por el cambio climático. Buesa *et al.* (2019) también observaron un retraso en la maduración de la uva cuando aplicaron deshojados de la parte superior del dosel vegetal (Figura 8), provocando una mejora del estado hídrico y de las tasas de intercambio gaseoso de las hojas (fotosíntesis neta y conductancia estomática).

Figura 8. Manejo de la vegetación un viñedo de 'Tempranillo' mediante un deshojado severo durante la fase de maduración de la uva

Por otra parte, en cultivos leñosos manejados en seto los agricultores pueden diseñar la arquitectura del dosel vegetal buscando modular la exposición a la luz solar. De esta manera, se altera el microclima dentro del dosel vegetal, lo que puede favorecer al rendimiento del cultivo y a su EUA. Un ejemplo de modificación de la arquitectura del dosel vegetal es la inclinación de la vegetación (Figura 9). En cultivos como la vid y frutales de pepita o hueso que se manejen con un sistema en seto, inclinar la vegetación hacia el oeste permite maximizar la radiación interceptada durante las primeras horas del día, y disminuirla durante la tarde, cuando el DPV de la atmósfera es más elevado. Esto puede resultar beneficioso para el balance hídrico del cultivo como se ha observado en melocotón (Losciale *et al.*, 2010) y en la eficiencia en el uso del agua del viñedo (Buesa *et al.,* 2020b). Para ampliar la información sobre el manejo de la vegetación en el viñedo se recomienda consultar los documentos técnicos publicados al respecto por Cajamar (Buesa *et al.,* 2017).

Figura 9. Detalle del manejo de la vegetación de un viñedo de 'Bobal' mediante la inclinación de la espaldera

Bibliografía

Acharya, C.L.; Hati, K.M.; Bandyopadhyay, K.K. (2005). Mulches. In: D. Hillel; C. Rosenzweig; D.S. Pawlson; M.I. Sorger; D.L. Sparks; J. Hatfield (Eds.), Encyclopedia of Soils (pp. 521-532). Elsevier.

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56 (300 pp.). FAO, Rome.

Buesa, I., Sanz, F., Pérez, D., Yeves, A., Martínez, A., Chirivella, C., Bonet, L., and Intrigliolo, D.S. (2017) Manejo del agua y la vegetación en el viñedo mediterráneo (69 pp). El Ejido, Almería, Fundación Cajamar.

Buesa, I., Caccavello, G., Basile, B., Merli, M.C., Poni, S., Chirivella, C. and Intrigliolo, D.S. (2019). Delaying berry ripening of Bobal and Tempranillo grapevines by late leaf removal in a semi-arid and temperate-warm climate under different water regimes. Australian Journal of Grape and Wine Research 25(1): 70-82.

Buesa, I.; Mirás-Avalos, J.M.; Intrigliolo, D.S. (2020a). Row orientation effects on potted-vines performance and water-use efficiency. Agricultural and Forest Meteorology 294: 108148.

Buesa, I., Ballester, C., Mirás-Avalos, J.M. and Intrigliolo, D.S. (2020b). Effects of leaning grapevine canopy to the West on water use efficiency and yield under Mediterranean conditions. Agricultural and Forest Meteorology 295: 108166.

Buesa, I., Mirás-Avalos, J.M., De Paz, J.M., Visconti, F., Sanz, F., Yeves, A., Guerra, D. and Intrigliolo, D.S. (2021). Soil management in semi-arid vineyards: Combined effects of organic mulching and no-tillage under different water regimes. European Journal of Agronomy 123: 126198.

Buesa, I., Yeves, A., Guerra, D., Sanz, F., Chirivella, C. and Intrigliolo, D.S. (2023). Testing field adaptation strategies for delaying grape ripening and improving wine composition in a cv. Macabeo Mediterranean vineyard. Frontiers in plant science 14.

Campos, I., Neale, C.M.U. and Calera, A. (2017). Is row orientation a determinant factor for radiation interception in row vineyards? Australian Journal of Grape and Wine Research 23(1): 77-86.

Caravia, L., Collins, C., Petrie, P.R. and Tyerman, S. (2016). Application of shade treatments during Shiraz berry ripening to reduce the impact of high temperature. Australian Journal of Grape and Wine Research 22(3): 422-437.

Corelli-Grappadelli, L. 2003. Light relations. In: Apples: botany, production and uses. CAB International, Wallingford, Oxon, UK, pp. 195-216.

DeVincentis, A.; Solis, S.; Rice, S.; Zaccaria, D.; Snyder, R.; Maskey, M.; Gomes, A.; Gaudin, A.; Mitchell, J. (2022). Impacts of winter cover cropping on soil moisture and evapotranspiration in California's specialty crop fields may be minimal during winter months. California Agriculture, 76(1): 37-45.

DeVincentis, A.J.; Sandoval Solis, S.; Bruno, E.M.; Leavitt, A.; Gomes, A.; Rice, S.; Zaccaria, D. (2020). Using cost-benefit analysis to understand adoption of winter cover cropping in California's specialty crop systems. Journal of Environmental Management, 261: 110205.

García-Díaz, A.; Marqués, M.J.; Sastre, B.; Bienes, R. (2018). Labile and stable soil organic carbon and physical improvements using groundcovers in vineyards from central Spain, Science of the Total Environment, 621: 387-397.

Glenn, D.M. and Puterka, G.J. (2005). Particle films: a new technology for agriculture. Horticultural reviews 31: 1-44.

Hsiao, T.C., Steduto, P. and Fereres, E. (2007). A systematic and quantitative approach to improve water use efficiency in agriculture. Irrigation Science 25(3): 209-231.

Iglesias, A.; Garrote, L. (2015). Adaptation strategies for agricultural water management under climate change in Europe. Agricultural Water Management, 155: 113–124.

Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC (2021). Water Cycle Changes. In: Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press; 2023:1055-1210.

Jarvis PG. 1985 Coupling of transpiration to the atmosphere in horticultural crops: the omega factor. Acta Horticulturae 171:187–205.

Kahlon, M.S.; Lal, R.; Ann-Varughese, M. (2013). Twenty-two years of tillage and mulching impacts on soil physical characteristics and carbon sequestration in Central Ohio. Soil and Tillage Research, 126: 151-158.

Kasirajan, S.; Ngouajio, M. (2012). Polyethylene and biodegradable mulches for agricultural applications: a review. Agronomy for Sustainable Development, 32: 501-529.

Kassam, A.; Basch, G.; Friedrich, T.; Shaxson, F.; Goddard, T.; Amado, J.C.T.; Crabtree, B.; Hongwen, I.; Mello, I.; Pisante, M.; Mkomwa, S. (2013). Sustainable soil management is more than what and how crops are grown. In: R. Lal; B.A. Stewart (Eds.), Principles of Sustainable Soil Management in Agroecosystems, Advances in Soil Science (pp. 337-399). CRC Press.

Linares Torres, R.; De La Fuente Lloreda, M.; Junquera Gonzalez, P.; Lissarrague García-Gutierrez, J.R.; Baeza Trujillo, P. (2018). Effect of soil management strategies on the characteristics of the grapevine root system in irrigated vineyards under semi-arid conditions. Australian Journal of Grape and Wine Research, 24: 439-449.

López-Urrea, R.; Sánchez, J.M.; Montoro, A.; Mañas, F.; Intrigliolo, D.S. (2020). Effect of using pruning waste as an organic mulching on a drip-irrigated vineyard evapotranspiration under a semi-arid climate. Agricultural and Forest Meteorology, 291: 108064.

Losciale, P., Chow, W.S. and Corelli Grappadelli, L. (2010). Modulating the light environment with the peach 'asymmetric orchard': effects on gas exchange performances,

photoprotection, and photoinhibition. Journal of Experimental Botany 61(4): 1177-1192.

Martínez-Lüscher, J., Chen, C.C.L., Brillante, L. and Kurtural, S.K. (2020). Mitigating Heat Wave and Exposure Damage to "Cabernet Sauvignon" Wine Grape With Partial Shading Under Two Irrigation Amounts. Frontiers in plant science 11(1760).

Morugán-Coronado, A.; Linares, C.; Gómez-López, M.D.; Faz, A.; Zornoza, R. (2020). The impact of intercropping, tillage and fertilizer type on soil and crop yield in fruit orchards under Mediterranean conditions: A meta-analysis of field studies. Agricultural Systems, 178: 102736.

Pappalardo, S.E.; Gislimberti, L.; Ferrarese, F.; De Marchi, M.; Mozzi, P. (2019). Estimation of potential soil erosion in the Prosecco DOCG area (NE Italy), toward a soil footprint of bottled sparkling wine production in different land-management scenarios. PLoS ONE, 14(5): e0210922.

Pereira, L.S.; Cordery, I.; Iacovides, I. (2009). Coping with Water Scarcity. Addressing the Challenges. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 382 pp.

Pretty, J. and Bharucha, Z.P. (2014). Sustainable intensification in agricultural systems. Annals of Botany 114(8): 1571-1596.

Prosdocimi, M.; Tarolli, P.; Cerdà, A. (2016). Mulching practices for reducing soil water erosion: A review. Earth-Science Reviews, 161: 191-203.

Ramos, T.B.; Darouich, H.; Pereira, L.S. (2024). Mulching effects on soil evaporation, crop evapotranspiration and crop coefficients: a review aimed at improved irrigation management. Irrigation Science 42, 525–539.

Rubio-Asensio, J.S., Abbatantuono, F., Ramírez-Cuesta, J.M., Hortelano, D., Ruíz, J.L., Parra, M., Martínez-Meroño, R.M., Intrigliolo, D.S. and Buesa, I. (2022). Effects of Cover Crops and Drip Fertigation Regime in a Young Almond Agroecosystem. Agronomy 12(11): 2606.

Sadras, O.V.; McDonald, G. (2012) Water Use Efficiency of Grain Crops in Australia: Principles, Benchmarks the Management. Grains Research the Development Corporation, South Australian Research the Development Institute, the University of Adelaide, Adelaide.

Santesteban, L.G., Miranda, C., Urrestarazu, J., Loidi, M. and Royo, J.B. (2017). Severe trimming and enhanced competition of laterals as a tool to delay ripening in Tempranillo vineyards under semiarid conditions. OENO One 51(2): 191-203.

Shellie, K.C. and King, B.A. (2013). Kaolin Particle Film and Water Deficit Influence Malbec Leaf and Berry Temperature, Pigments, and Photosynthesis. American Journal of Enology and Viticulture 64(2): 223-230.

Somanathan, H.; Sathasivam, R.; Sivaram, S.; Kumaresan, S.M.; Muthuraman, M.S.; Park, S.U. (2022). An update on polyethylene and biodegradable plastic mulch films and their impact on the environment. Chemosphere, 307: 135839.

Steenwerth, K.L.; McElrone, A.J.; Calderón-Orellana, A.; Hanifin, R.C.; Storm, C.; Collatz, W.; Manuck, C. (2013). Cover Crops and Tillage in a Mature Merlot Vineyard Show Few Effects on Grapevines. American Journal of Enology and Viticulture, 64: 515-521.

Tautges, N.E.; Chiartas, J.L.; Gaudin, A.C.M.; O´Geen, A.T.; Herrera, I. (2019). Deep soil inventories reveal that impacts of cover crops and compost on soil carbon sequestration differ in surface and subsurface soils. Global Change Biology, 25(11): 3753-66.

Tomaz, A.; Coleto Martínez, J.; Arruda Pacheco, C. (2021). Effects of cover crops and irrigation on 'Tempranillo' grapevine and berry physiology: an experiment under the Mediterranean conditions of Southern Portugal. OENO One, 3: 191-208.

Tomaz, A.; Pacheco, C.A.; Coleto Martinez, J.M. (2017). Influence of cover cropping on water uptake dynamics in an irrigated Mediterranean vineyard. Irrigation and Drainage, 66: 387–395.

Trigo-Córdoba, E.; Bouzas-Cid, Y.; Orriols-Fernández, I.; Díaz-Losada, E.; Mirás-Avalos, J.M. (2015). Influence of cover crop treatments on the performance of a vineyard in a humid region. Spanish Journal of Agricultural Research, 13(4), e0907, 12 pp.

Williams, L.E. and Ayars, J.E. (2005). Grapevine water use and the crop coefficient are linear functions of the shaded area measured beneath the canopy. Agricultural and Forest Meteorology 132(3–4): 201-211

Multifuncionalidad de las mallas agrotextiles

Los agrotextiles avanzados son una herramienta para luchar contra el cambio climático y reducir el consumo de agua de los cultivos

El agua es uno de los bienes más escasos en el mundo y el cambio climático afecta gravemente el suministro. De toda el agua del mundo, solo un 3% está disponible; del agua dulce disponible, la agricultura utiliza el 89% y la industria y las personas personas alrededor del 10%.

Según FAO, la producción de alimentos en regadío aumentará en más de un 50% para 2050, pero la cantidad de agua reservada para la agricultura puede aumentar sólo un 10 por ciento, asumiendo que haya mejoras en las técnicas de riego. lo que significa que habrá que hacer más con menos agua.

En este contexto de la escasez mundial de agua y los desafíos para el ahorro de agua en los sistemas agrícolas, es necesario hacer intervenciones y utilizar tecnologías que ayuden al ahorro real de agua en los sistemas agrícolas.

Pantallas agrícolas avanzadas

Dependiendo de su estructura, color y nivel de sombreado, los agrotextiles pueden ser una herramienta agrícola sencilla y eficaz para aumentar el ahorro de agua.

Multifuncionalidad de la pantalla

La pantalla agrotextil puede desempeñar un papel importante en los sistemas de producción de alimentos.

El **GRUPO ARRIGONI**, en colaboración con universidades, agrónomos y agricultores, se compromete a hacer una contribución fundamental a la producción agrícola, a través de la evaluación del ahorro de agua que puede aportar una malla.

Los agrotextiles pueden proporcionar **control climático, pero también protección contra el granizo, el viento y la radiación solar excesiva.**

Además, se pueden emplear mosquiteros y redes para impedir las plagas de insectos y reducir o eliminar el uso de agroquímicos.

Campo experimental de Arrigoni donde se compara el efecto de diferentes tipos de malla en diferentes aspectos; uno de ellos, el ahorro de agua

Las pantallas transmiten la luz solar en un rango de longitud de onda específico, aumentan la eficiencia del uso de la radiación y afectan la morfología y fisiología de las plantas, los rendimientos tanto a nivel de plantas como de ecosistemas, e incluso pueden ser un factor que afecta la floración y el crecimiento de las plantas, así como el rendimiento de los frutos, especialmente con el agua ajustada necesaria.

Ensayos de evaporación en el campo experimental Arrigoni

Los ensayos de Arrigoni tienen como objetivo comparar las cantidades de agua evaporada ya sea que los cultivos estén cubiertos o no por redes (cultivo en campo abierto versus cultivo protegido).

El campo experimental está situado en Arrigoni de Putignano (BA) y cuenta con un tanque evaporimétrico y un sistema de detección de datos climáticos que permiten, a través de la fórmula de Penman Monteith, calcular ET0. La metodología utilizada es la aprobada por FAO.

Se compara la cantidad de agua evaporada por parcelas protegidas o no con mallas. Los **primeros ensayos se hicieron en 2022 y continúan realizándose**. Se estimó el porcentaje aproximado de ahorro de agua por evapotranspiración para cada pantalla en diferentes condiciones climáticas.

Ahorros cercanos al 50% según los tipos de malla

El cuadro a continuación muestra los resultados de los ensayos. Se trata de: 8 pruebas diferentes y rendimiento de ahorro de agua de varias pantallas diferentes en su densidad, color y aplicación principal.

Estos ensayos **han permitido incorporar a la ficha técnica de cada tipo de malla su efecto en la reducción de la evapotranspiración** y, en consecuencia, el porcentaje de ahorro de agua.

Por ejemplo, con malla antigranizo simple se puede ahorrar hasta un 32% de agua y con pantalla de sombreado medio con aditivos especiales hasta un 46,9%.

Article	P.O.	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TEST 5	TEST 6	TEST 7	TEST 8
		Da 29/7/21 a 5/8/21	Da 02/5/22 a 27/5/22	Da 03/6/22 a 20/6/22	Da 22/6/22 a 02/7/22	Da 04/7/22 a 07/7/22	Da 12/7/22 a 22/7/22	Da 28/7/22 a 5/8/22	Da 5/8/22 a 11/8/22
		Tmedia =	Tmedia = 24,08 °C	Tmedia = 23,71 °C	Tmedia = 28,66 °C	Tmedia = 26,37 °C	Tmedia = 24,10 °C	Tmedia = 25,43 °C	Tmedia = 25,38 °C
		Tmax =	Tmax = 28,53 °C	Tmax = 28,97 °C	Tmax = 35,01 °C	Tmax = 34,22 °C	Tmax = 31,21 °C	Tmax = 31,59 °C	Tmax = 31,71 °C
		Tmin =	Tmin = 18,13 °C	Tmin = 17,45 °C	Tmin = 20,12 °C	Tmin = 17,82 °C	Tmin = 15,09 °C	Tmin = 17,97 °C	Tmin = 18,10 °C
		URmedia =	URmedia = 52,33%	URmedia = 52,98%	URmedia = 43,68%	URmedia = 52,23%	URmedia = 49,78%	URmedia = 52,99%	URmedia = 56,76%
		V vento = 0,30 m/s	V vento = 1,5 m/s	V vento = 1,38 m/s	V vento = 1,11 m/s	V vento = 1,13 m/s	V vento = 1,21 m/s	V vento = 1,24 m/s	V vento = 1,31 m/s
COPERTURA 100%	100%							75,4%	53,8%
2210WO	12%			20,8%	34,6%				
2240GR	22%					28,0%			
2474WO	78%			37,7%					
2495 OMBRA SO	90%		33,7%						
2598BG	75%			35,9%					
2633BL PRISMA LDF	30%		20,1%				40,6%	40,48% - (53,7%) *	
2681BL PRISMA MDF	49%	39,0%	22,1%				46,9%	46,03% - (61,0%) *	
2681GP	65%					36,0%	55,2%		
2694BL PRISMA HDF	57%		25,0%				50,0%	48,42% - (64,2%) *	
3050NE	40%								18,75% - (34,9%) *
3070NE	59%								41,25% - (76,7%) *
3090NE	80%				53,9%				
3123BT	4%					16,0%			
3123NE	18%					32,0%			
3532BT	22%				38,5%				
3740GP	40%								22,5% - (41,8%) *
6040BT	13%			18,9%	23,1%				

Resultados de los ensayos mostrando la de evaporación en cultivo al aire libre o protegido por mallas

El Grupo Arrigoni, experiencia de más de 60 años

Desde hace más de 60 años Arrigoni está presente en el sector del textil técnico, desarrollando, fabricando y distribuyendo agrotextiles innovadores para un mejor control climático y una producción de alimentos más sana y segura. Actualmente es el líder europeo en aplicaciones textiles técnicas para la agricultura, con una producción que permite cubrir más de 75 millones de m² al año. Arrigoni está presente en 72 países gracias a sus distribuidores.

El ciclo de producción es 100% integrado y comprende el departamento de extrusión, departamento de tejido, líneas de conversión y laboratorio de I+D. Los equipos de extrusión, tejido y conversión están a la vanguardia de la tecnología.

La actividad de I+D y el control de calidad son el foco principal de la empresa.

Un proceso productivo controlado íntegramente, con **producción propia del hilo, de polietileno vegetal puro, con aditivos de calidad**. La extrusión y tejido se realizan en el departamento de tejido y el laboratorio, modernamente equipado, controla toda la producción, desde la fibra hasta el producto final. La tecnología propia permite la fabricación a medida de pedidos especiales**.**

La demanda de agrotextiles crece

Diferentes tendencias dan como resultado una demanda creciente de agrotextiles. Las principales entre ellas son:

- El cambio climático ("tropicalización" y fenómenos meteorológicos extremos), que aumenta las necesidades de protección de los cultivos
- La presencia de nuevas especies de insectos provenientes de otros continentes
- Cambio en los hábitos alimentarios, con mayor sensibilidad a los alimentos orgánicos y a los alimentos seguros.
- Modernización de la agricultura y máxima atención a la sostenibilidad medioambiental (por ejemplo, reducción de las necesidades de agua y reducción drástica de los tratamientos químicos de los cultivos)
- Tendencia a sustituir plásticos en la producción de frutas y verduraspor pantallas textiles para preservar la fragancia y vida útil del producto.

Agrotextiles avanzados, innovación permanente

El ingrediente fundamental del lema «**agrotextiles avanzados**» de Arrigoni es la Ia I+D, pilar de la innovación. Gran parte de los beneficios de la empresa se invierte en investigación y desarrollo para una mejora continua de los productos.

Esto permite apoyar a los productores de todo el mundo en la lucha contra los cambios climáticos, las condiciones climáticas desfavorables, las especies de insectos invasores y permitir la producción de alimentos saludables y la agricultura sostenible.

Mucho más allá de la simple protección

Arrigoni desarrolló y continúa investigando en nuevas mallas con una gama de funcionalidades más allá que la simple protección.

Los **temas que aborda la I+D** se definen atendiendo a las necesidades de los productores en diferentes climas y condiciones de cultivo. Los principales son:

- Permeabilidad al aire de los agrotextiles; se trabaja en mejorar la permeabilidad del aire con el mismo control de plagas
- Permeabilidad a la lluvia de pantallas técnicas
- Interacción activa de pantallas textiles con el entorno exterior
- Interacción de pantallas textiles con la luz
- Efectos microclimáticos inducidos por la presencia de las pantallas textiles en el ahorro de agua, control de la temperatura (refrigeración / calentamiento) y calidad de la luz

Desarrollo de soluciones multifuncionales que puedan controlar la lluvia, el granizo, el viento, los insectos y otros factores que afectan la producción.

Contacto

ARRIGONI S.P.A
Via Monte Prato, 3
22029 UGGIATE TREVANO (MI) – ITALIA
Tel.: (+39) 031 803 200
info@arrigoni.it
https://www.arrigoni.it/agrotextile/

BLOQUE II. BASES AGRONÓMICAS DEL RIEGO DE PRECISIÓN

2.1. Bases agronómicas del riego

Mª Rosario Conesa Saura[1], Juan Miguel Robles García[2] y Juan Gabriel Pérez Pérez[3]*

[1] *Departamento de Riego, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC)*
[2] *Equipo de Riego y Fisiología del Estrés, Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental (IMIDA)*
[3] *Grupo de Riegos, Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (CDAS-IVIA)*

* perez_juaperb@gva.es

Índice

1. Relaciones hídricas del sistema suelo-agua-planta 50
1.1. El agua en el suelo 50
1.2. El agua en la planta 55
2. Riego localizado por goteo 59
2.1. Situación actual en España 59
2.2. Fundamentos técnicos 60
2.3. Importancia del diseño agronómico 60
2.4. Factores a tener en cuenta en el diseño agronómico 60
2.5. Necesidades máximas de riego 61
2.6. Diseño agronómico en riego localizado 62
2.7. Tendencias e investigaciones acerca del diseño agronómico en riego por goteo 67
3. Riego localizado subterráneo 70
3.1. Concepto de riego localizado subterráneo 70
3.2. Consideraciones en la instalación del riego localizado subterráneo 72
3.3. Componentes en la instalación del riego localizado subterráneo 73
3.4. Mantenimiento general de instalaciones en riego localizado subterráneo 74
3.5. Tendencias e investigaciones acerca del riego localizado subterráneo 74

Resumen

La agronomía del riego es un campo fundamental en la gestión eficiente de los recursos hídricos en la agricultura. Este enfoque aborda las complejas interacciones entre el suelo, el agua y la planta, con el objetivo de optimizar el rendimiento de los cultivos, minimizar el estrés hídrico y maximizar el uso sostenible del agua.

La comprensión de las relaciones suelo-agua-planta es esencial para el diseño de sistemas de riego eficientes. El suelo actúa como un reservorio de agua, donde las propiedades físicas y químicas influyen en la retención y disponibilidad de agua para las plantas. La textura del suelo, su estructura, capacidad de retención de humedad y contenido de materia orgánica son factores determinantes en la capacidad del suelo para retener y suministrar agua a las plantas. El equilibrio hídrico del suelo, regulado por fenómenos como la evaporación, la infiltración y la percolación, juega un papel crucial en el desarrollo y crecimiento de las plantas.

Los sistemas de riego localizado, como el riego por goteo y el riego por aspersión, se han convertido en opciones preferidas en la agricultura moderna debido a su alta eficiencia en el uso del agua y la energía. Estos sistemas suministran agua directamente a la zona radicular de las plantas, minimizando las pérdidas por evaporación y escorrentía. Además, permiten una aplicación precisa de agua y nutrientes, lo que favorece un crecimiento uniforme y una mayor eficiencia en la fertilización. Sin embargo, el diseño y manejo adecuado de los sistemas de riego localizado son cruciales para evitar problemas como la obstrucción de los emisores, la acumulación de sales en la zona radicular y la distribución desigual de agua.

En resumen, la agronomía del riego es un campo multidisciplinario que integra conocimientos de la física del suelo, la hidrología, la química del agua y la fisiología vegetal para optimizar el uso del agua en la agricultura. El desarrollo y aplicación de prácticas y tecnologías adecuadas en este campo son fundamentales para garantizar la sostenibilidad y productividad de los sistemas agrícolas en un contexto de cambio climático y escasez de recursos hídricos.

1. Relaciones hídricas del sistema suelo-agua-planta

Las relaciones hídricas en el sistema suelo-agua-planta son fundamentales para comprender cómo el agua es absorbida, transportada y utilizada por las plantas durante su crecimiento y desarrollo. Estas interacciones son complejas y están influenciadas por una variedad de factores, incluyendo las propiedades físicas y químicas del suelo, las condiciones climáticas, y las características fisiológicas de las plantas. En este análisis detallado, exploraremos los principales aspectos de estas relaciones hídricas y su importancia en el contexto del riego de precisión.

1.1. El agua en el suelo

El suelo es un sistema complejo, disperso, poroso (contiene partículas minerales, aire y agua) y, sobre todo, dinámico, ya que la retención de agua se encuentra en permanente evolución y depende de diversos factores. Desde el punto de vista del crecimiento de las plantas, el suelo es un sistema que almacena agua y nutrientes para los cultivos; sirve de anclaje y soporte para las plantas y es un hábitat para múltiples organismos. La importancia de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo se debe a que determina la frecuencia o el intervalo de riegos, factor fundamental para el desarrollo de los cultivos. La cantidad de agua que puede almacenar un suelo depende básicamente de sus características fisicoquímicas.

La fase sólida del suelo está formada por partículas minerales finamente subdivididas, de tamaño, forma y composición químicamente diferentes. Por sus dimensiones, la clasificación

más usada es la propuesta por la USDA (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos), que se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación textural del USDA

Sistema del Dpto. de Agricultura de EE.UU.		**Sistema Internacional**
Fracción del Suelo	*Diámetros límites (mm)*	*Diámetros límites (mm)*
Arena muy gruesa	2.00 - 1.00	
Arena gruesa	1.00 - 0.50	
Arena media	0.50 - 0.25	2.00 - 0.02
Arena fina	0.25 - 0.10	
Arena muy fina	0.10 - 0.05	
Limos	0.05 - 0.002	0.02 - 0.002
Arcilla	Menos de 0.002	Menos de 0.002

Fuente: USDA, 1951

Se denomina textura a la característica física de la muestra de suelo que expresa las propiedades de las partículas de arena, limo y arcilla. Para su identificación se utiliza el diagrama triangular de textura donde se define la clase textural que le corresponde a un suelo concreto (Groenendyk *et al*., 2015). La Figura 1 muestra el diagrama triangular de textura propuesto por USDA, con las proporciones de cada tipo de textura, y en la matriz del mismo, las 12 clases texturales en que pueden ser clasificados los suelos (USDA, 1951).

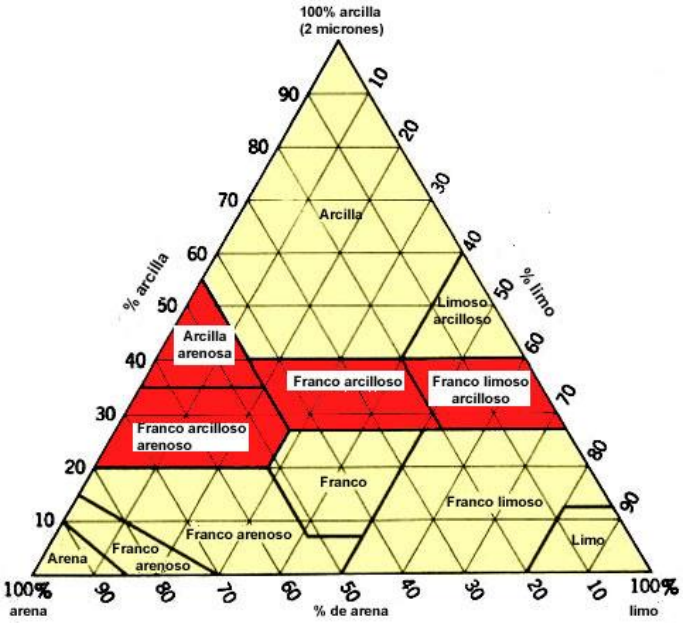


Figura 1. Triángulo textural del suelo de la USDA. Fuente: https://www.fao.org/fishery/static/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s06.htm)

Un suelo arcilloso es un suelo de textura fina, mientras que un suelo arenoso es un suelo de textura gruesa. La textura está relacionada con la cantidad total de poros (micro y macroporos), y estos, con la capacidad de retener y almacenar agua para las plantas. Los microporos son capaces de retener el agua de riego, mientras que, en los macroporos el agua percola con facilidad. Un suelo arenoso es muy permeable, pues en ellos predominan los macroporos. Su baja microporosidad dificulta la disponibilidad del agua para las plantas, por lo que suelen recibir riegos de alta frecuencia. La labranza en ellos es cómoda ya que no presentan problemas de compactación. En un suelo limoso, la permeabilidad varía según su estructura, es decir, con la

capacidad de formar agregados. Presentan mejor disponibilidad del agua para las plantas que los suelos arenosos. Los suelos arcillosos son suelos pesados con una permeabilidad muy baja (fácilmente encharcables) y mal aireados, pues en ellos predominan los microporos. Sin embargo, son suelos con elevado contenido en materia orgánica, que retienen una mayor cantidad de agua. Se puede generalizar afirmando que, los suelos arcillosos tienen una mayor capacidad de retención de agua que los suelos arenosos. Por su parte, los suelos francos, presentan una mezcla de arena, limo y arcilla en proporciones equilibradas, siendo el mejor tipo de suelo para el crecimiento de las plantas. Estos son ligeros, permeables, y de media-alta capacidad de retención de agua (aunque no retienen tanto como los arcillosos).

Por otro lado, las partículas sólidas del suelo se unen formando grupo de partículas de mayor tamaño o lo que se conoce como agregados, que llegan a alcanzar tamaño y forma diferentes, constituyendo lo que conocemos como **estructura del suelo**. En este sentido, la estructura juega un papel fundamental, en la productividad del suelo, afectando a la penetración de raíces, capacidad de infiltración del agua, su movimiento dentro del suelo, y la resistencia a la erosión, según la estabilidad de los agregados. La intensidad de agregación depende de la cohesión dentro de los agregados, de la adhesión entre ellos y del contenido de humedad.

Otro aspecto importante para considerar es el espacio poroso que determina la densidad y compactación del suelo. El espacio poroso en un suelo presenta gran variación de acuerdo con el tipo de suelo y la forma en que éste ha sido manejado. Por ejemplo, los suelos con vegetación natural y de cobertura, por lo general exhiben una alta porosidad a causa de la intensa actividad biológica, presentando cualidades físicas superiores, en comparación a los suelos desnudos.

El espacio poroso total (ξ) del suelo se expresa como porcentaje de poros en relación con el volumen total de suelo, éste varía normalmente entre el 40 y 50 % del volumen del suelo. Se calcula mediante la Ecuación 1:

$$\xi = 1 - \frac{d_a}{d_r} \times 100 \quad \text{(Ec. 1)}$$

Donde:

- ξ: porcentaje del espacio poroso
- d_a: densidad aparente
- d_r: densidad real

Por su parte, la densidad es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que éste ocupa. Dado que el suelo es un cuerpo formado por tres fases: sólida, líquida y gaseosa, suelen tomarse dos tipos de densidades: la densidad aparente (d_a) y la densidad real (d_r). La d_r, de las partículas densas del suelo varía con la proporción de elementos que contiene, y en general alcanza un valor de 2.65 g cm^{-3}. La d_a ejerce un alto grado de influencia sobre la productividad de los cultivos dada su estrecha relación con otras propiedades del suelo. A medida que la da aumenta, se incrementa la compactación limitando a su vez el crecimiento de raíces (Heuscher *et al*., 2005). Asimismo, la da resulta afectada por el contenido de materia orgánica de un suelo, de forma que a medida que aumenta la materia orgánica, disminuye la da y viceversa (Yue *et al*., 2017). En suelos arcillosos, la da varía entre 1.0 y 1.2 g cm^{-3}, mientras que en suelos arenosos es mayor, pudiendo variar entre 1.6 y 1.8 g cm^{-3} (Heuscher *et al*., 2005).

Movimiento de agua en el suelo

El movimiento de agua en el suelo es uno de los procesos físicos dinámicos más importantes a la hora de diseñar sistemas de riego (Steward *et al*., 2018). Por ello, es necesario comprender los principios básicos del flujo de agua.

El flujo de agua a través de una columna de suelo uniforme y bajo condiciones de saturación, viene dada por la ley de Darcy en dirección vertical (acción de la gravedad unidimensional), la cual establece que la velocidad media del flujo del agua a través de los suelos es proporcional al gradiente hidráulico como sigue:

$$q = \frac{V}{A.t} = -K\frac{\Delta\Psi_H}{\Delta Z} \text{ (Ec. 2)}$$

Siendo q (cm/h) el flujo de agua que atraviesa el suelo por unidad de área y unidad de tiempo; K (cm/h) el coeficiente de proporcionalidad dependiente del contenido de agua para un mismo suelo; $\Delta\ \Psi_h$ (cm) la diferencia de potencial hidráulico entre los puntos en los que se estudia el flujo; y ΔZ (cm) la distancia comprendida entre los puntos de estudio.

La dirección del flujo está determinada por el gradiente hidráulico de forma que, si es menor que 0, el flujo es descendiente; si es mayor que 0 el flujo es ascendente y es igual a 0, el flujo es nulo. En un mismo perfil de suelo, podemos encontrar situaciones de flujo descendente, ascendente o nulo. Estas situaciones son muy comunes tras una lluvia o riego insuficientes para humectar todo el suelo, siendo un proceso aún más complejo cuando interviene la extracción radicular.

A modo de ejemplo, imaginamos que disponemos de un suelo seco que recibe una lluvia que lo humedece hasta una determinada profundidad. Tras unos días soleados, las capas superficiales pierden humedad por evaporación (movimiento ascendente del agua). Dado que la lluvia no consiguió aumentar las capas más profundas, el flujo de agua aquí es descendente a mayores profundidades.

No obstante, la ley de Darcy presenta ciertas limitaciones, ya que el flujo de agua origina no solo cambios en el contenido volumétrico de agua en el suelo (Θ_v), sino también cambios en K y $\Delta\Psi_H$, así como la extracción radicular. Por tanto, también se utilizan ecuaciones como la de Richards de 1956, que indica la diferencia de un flujo de agua entrante y saliente en un volumen de suelo conocido.

Por otra parte, se conocen dos procesos relacionados con el flujo de agua en el suelo que son relevantes para el manejo del riego (Steward *et al*., 2018)

- **Infiltración**: proceso mediante el cual el agua penetra en el suelo cuando ésta entra en contacto con su superficie, bien por la práctica del riego o lluvia.
- **Redistribución**: proceso que se inicia al finalizar la infiltración, y mediante el cual el agua continua en movimiento en función de los gradientes de potencial hidráulico.

La importancia del conocimiento de estos procesos es esencial para el control de la recarga al perfil del suelo del agua perdida por evapotranspiración, así como también para el manejo del lavado de suelos salinos y alcalinos sometidos a procesos de recuperación. La velocidad de infiltración indica la capacidad de un suelo de absorber agua. Al principio (cuando el suelo está

más seco), la velocidad de infiltración es más rápida. Luego disminuye hasta que llega un momento en que se hace más o menos constante. En suelos arcillosos la velocidad de infiltración es más lenta que en suelos arenosos (Steward *et al*., 2018).

Otro factor que afecta a la infiltración es el método de riego utilizado. En el riego por goteo, por ejemplo, es necesario conocer cuánto tiempo se requiere para aplicar una lámina de agua deseada. Mientras que, para un riego por aspersión, es necesario conocer la velocidad de infiltración, para realizar la correcta elección del aspersor a utilizar.

Disponibilidad del agua en el suelo

Tras una lluvia abundante, se alcanza valores de Θ_v altos, llegando a ocupar el agua todos los poros del suelo. En ese estado, se considera que el suelo está saturado de agua. Por gravedad, el agua tiende a moverse hacia las capas más profundas, hasta llegar a un punto en que el drenaje es tan pequeño que Θ_v se estabiliza. Es lo que conocemos como capacidad de campo (CC). El agua retenida puede ser absorbida por las plantas. Pero a medida que disminuye, se llega a un punto en el que la planta no puede aprovecharla. En este estado, se dice que el suelo está en punto de marchitez permanente (PMP). La diferencia entre CC y PMP representa la fracción de agua útil disponible para el cultivo. Este concepto, permite determinar cuál será la lámina que se debe reponer en un riego y el momento óptimo para realizarlo, definiendo un umbral de riego para cada cultivo y etapa de crecimiento.

Tabla 2. Valores característicos en suelos según su textura

Suelos	CC (% Vol.)	PMP (%Vol.)	Agua útil (%Vol.)	d_a (g cm^{-3})
Arenosos	8	3	5	1.75
Franco	30	14	16	1.50
Arcilloso	46	32	14	1.35

CC: Contenido de humedad a capacidad de campo (%); PMP: Punto de marchitez permanente (%); y da: densidad aparente (g cm^{-3}).

En la programación del riego por goteo, se utiliza comúnmente como valor umbral el valor de CC o un valor derivado de este denominado agotamiento máximo permisible (AMP). Este concepto que se define como una fracción de la diferencia entre el valor de Θ_v en CC y PMP, y viene dado por la siguiente ecuación (Merriam, 1960; Allen *et al*., 1998):

$$AMP\ (mm) = \alpha \times (\mathrm{CC} - \mathrm{PMP}) \times \mathrm{z} \quad \text{(Ec.3)}$$

Donde CC es la capacidad de campo, PMP es el punto de marchitez permanente, α es el déficit hídrico del suelo permitido fijado y z es la profundidad del suelo (en mm). El AMP representa la fracción del agua disponible total del suelo que puede agotarse antes de que las plantas experimenten estrés hídrico. Este concepto ha sido ampliamente utilizado como criterio para activar el riego en especies leñosas cuando se alcanzaban valores umbrales de CC-AMP (Vera *et al*., 2021).

Potencial hídrico del suelo

Desde el punto de vista del riego por goteo, no sólo es importante conocer el Θ_v, sino la energía que posee el agua en el suelo, para conocer si ésta se encuentra o no disponible para el cultivo. La fuerza con que el agua es retenida por el suelo depende del Θ_v y mientras menor sea este, mayor será la cantidad de trabajo necesario para extraerla. El movimiento del agua del suelo

hacia las plantas, la atmósfera o bien hacia otras zonas del suelo está regulado por gradientes de potencial (diferencias de estados energéticos). El agua en el suelo esta retenida por varias fuerzas: la acción de la gravedad, la presencia de solutos disueltos, y la tensión superficial en la interfase sólido-líquido. Estas fuerzas son la causa de que el agua sea adsorbida por las raíces, retenida y drenada en el suelo y/o evapotranspirada por las hojas.

1.2. El agua en la planta

En la agricultura de regadío, el agua es el principal factor limitante de la producción, siendo esta afección particularmente negativa en climas semiáridos y secos como en el sureste español, donde la disponibilidad del agua es menor.

Además de las pérdidas de producción debidas a la falta de agua (estrés hídrico), se suman las originadas por la acción conjunta de otros factores bióticos y ambientales (altas temperaturas, salinidad, salud del suelo, etc.). En este sentido, resulta necesario entender los efectos de un suministro del riego inadecuado sobre las relaciones hídricas y sus consecuencias para el crecimiento de las plantas.

La importancia del agua para las plantas es clara si se tiene en cuenta su abundancia y las funciones vitales que desempeña, tales como: su papel constituyente (principal componente de los tejidos vegetales) y disolvente (principal disolvente de los solutos almacenados en las células), su capacidad para mantener la turgencia celular y temperatura de las hojas, y su aptitud para participar en multitud de procesos bioquímicos que ocurren en el interior de las plantas (e.j. transpiración y fotosíntesis).

Estado hídrico de la planta

La planta representa la interfaz entre el suelo y la atmósfera por lo que el estado hídrico de la planta viene determinado por factores tanto ambientales como fisiológicos (Figura 2). Entre ellos destacan:

- El potencial del agua en el suelo y los factores/eventos involucrados (e.j. lluvia, riego, distribución radicular, y propiedades hidrofísicas del suelo, textura, etc.).
- La evapotranspiración del cultivo y los factores implicados (factores de cultivo, arquitectura de la planta, tasa de apertura de estomas, etc.).
- Conductancia hidráulica raíz-parte aérea. Este parámetro depende de las características físico-químicas de los tejidos vegetales e influye en la velocidad de transporte de agua.
- Turgencia de los tejidos vegetales, que a su vez puede ser modificado por ajuste osmótico o elástico.

De manera relativa, el estado hídrico de la planta se cuantifica a partir del contenido relativo de agua (CRA), concepto que hace referencia al porcentaje de agua que tiene un tejido fresco, respecto al máximo que podría contener a plena turgencia, y viene dado por la ecuación:

$$CRA = \frac{Peso\ fresco - Peso\ seco}{Peso\ máxima\ turgencia - Peso\ seco} \times 100 \quad \text{(Ec. 4)}$$

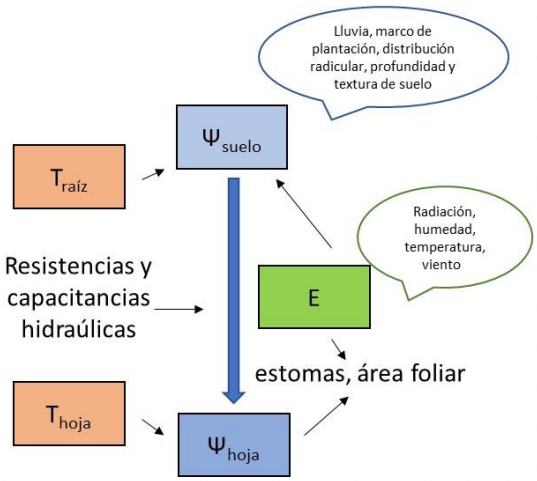


Figura 2. Diagrama de los factores que controlan el estado hídrico de la planta. Adaptado de Jones (1990). Ψ = potencial, T= turgencia, E= evaporación

El Potencial hídrico: componentes y medida

El concepto de potencia hídrico da una base más física al estudio del agua en el suelo y en la planta. El término de potencial hídrico (Ψ_h), como medida termodinámica de la energía con la que esta retenida el agua en la planta, es similar al empleado para el agua en el suelo. En este sentido, aunque en rigor se trata de una energía, puede expresarse en unidades de presión.

El (Ψ_h) de modo similar a lo visto para el suelo viene dado por la suma de sus componentes, que son:

$$\Psi h = \Psi o + \Psi p + \Psi m + \Psi g \quad \text{(Ec. 5)}$$

siendo:

- Ψ_o = potencial osmótico, negativo, es debido a los solutos disueltos en el jugo celular, principalmente en las vacuolas. La presencia de solutos disminuye el potencial agua. Para soluciones diluidas y considerando solutos que no se disocian, el potencial osmótico está representado por la ecuación de Van't Hoff:

$$\Psi o = -R\,T\,c \quad \text{(Ec. 6)}$$

- R = constante de los gases (8,32 J/mol K o 0,0083 kg MPa/mol K)
- T= Temperatura absoluta (K)
- c = concentración del soluto (mol/kg de solvente, en soluciones diluidas se utiliza mol/L de solución)
- Ψ_p = potencial de presión, positivo, debido a la presión producida como consecuencia de la difusión del agua al protoplasto encerrado en la célula vegetal. Su valor depende de la elasticidad de la pared celular, y de la concentración de agua en la célula.
- Ψ_m = potencial matricial, negativo, se refiere al agua retenida en las micro-capilaridades o enlazada a las superficies de las paredes celulares y otros componentes. Su estudio se suele omitir en la evaluación de las relaciones hídricas.
- Ψ_g = potencial gravitatorio, negativo, debido a la altura del agua en la planta (sólo es relevante en árboles de gran altura), y su cálculo viene dado por

$$\Psi g = \delta\,g\,h \quad \text{(Ec. 7)}$$

donde δ es la densidad del agua, g es la aceleración de la gravedad y h es la altura (varía unos 0.01 MPa por cada metro).

Cabe destacar que, en los tejidos vegetales, tanto Ψ_g como Ψ_m son poco importantes y suelen despreciarse.

Existen diferentes métodos para la determinación del potencial hídrico y sus componentes en tejidos vegetales. El Ψ_o puede determinarse mediante un osmómetro, que se basa en métodos psicrométricos (Gucci *et al*., 1997). También puede determinarse con cámara de presión en condiciones de laboratorio, aunque su método está en desuso. El Ψg se determina fácilmente a partir de la altura del agua en la planta, mientras que la medida de Ψ_p necesita de la estimación previa de Ψ_o y Ψ_h.

Para la medida directa de Ψ_h, el método más utilizado es la cámara de presión (Scholander, 1965). Esta cámara es estanca y se conecta a una bomba de presión regulable con un manorreductor (Figura 3A). En cuanto al procedimiento de medida, se introduce el peciolo cortado de la hoja en la cámara, y se aplica de manera progresiva presión hasta que aparezca la savia en el extremo del peciolo cortado. En este punto, la presión de la cámara indica el valor de potencial hídrico foliar (Ψ_{hoja}) al que estaba sometida la hoja antes de cortarla, ya que el potencial osmótico en el xilema puede considerarse despreciable. Las lecturas de presión más altas indican que el agua dentro del tejido vegetal está fuertemente retenida (mayor estrés hídrico), por lo que el Ψ_{hoja} es más bajo (más negativo). Se conoce que Ψ_{hoja} varía a lo largo del día con el ambiente alcanzando valores mínimos a mediodía solar. En consecuencia, las mediciones del potencial hídrico de tallo a mediodía, (Ψ_{tallo}) es un indicador más preciso para estimar el estado hídrico de la planta (Shackel *et al*. 1997). Para ello, es necesario cubrir una hoja sana, no expuesta al sol y situada cerca del tronco, con plástico de polietileno negro y papel de aluminio (o bolsas ZIP aluminizadas) durante al menos dos horas para limitar la transpiración (Fig. 2B) y permitir que el potencial hídrico alcance un equilibrio (Hsiao, 1990). Dado que la transpiración de la hoja está suspendida, el Ψ_{tallo} representa la salud hídrica del árbol, y sus valores son menos variables que los de Ψ_{hoja}. Sin embargo, ambos indicadores son mediciones muy laboriosas y destructivas, ya que se determinan manualmente con cámara de presión por lo que no pueden automatizarse para una programación precisa del riego.

En este sentido, gracias a los avances en las nuevas tecnologías, se han desarrollado recientemente sensores de planta conocidos como microtensiometros que son capaces de monitorear de forma continua el potencial hídrico del tronco (Ψ_{tronco}). Este sensor se inserta directamente en la superficie del tronco hasta llegar al cambium (Figura 2C) y proporciona lecturas muy precisas en tiempo real. Los estudios más recientes han demostrado que son capaces de estimar el estado hídrico de los árboles en un rango de unidades similar (± 0.30 MPa) a las medidas obtenidas de Ψ_{tallo} con la cámara de presión (Blanco and Kalcits, 2021; Conesa *et al*., 2023).

Los cambios de Ψ_h y de sus componentes se pueden representar mediante el diagrama de Höfler, el cuál plantea los conceptos de plasmólisis (pérdida de agua celular) y turgencia (ganancia de agua celular). Este diagrama muestra las relaciones entre Ψ_p, Ψ_o, y Ψ_h a medida que el celular se modifica (Tyree, 1984).

Por otra parte, las curvas presión-volumen (P-V) representan un medio útil para establecer relaciones entre contenido hídrico y Ψh, a partir de las medidas gravimétricas y con cámara de presión, respectivamente. Para su determinación, se toma una hoja en estado a plena turgencia y se determina su peso fresco y correspondiente Ψ_{hoja}. Posteriormente, se deja deshidratar la hoja (en penumbra) y se toman diversas lecturas de Ψ_{hoja} y de peso fresco. Cuando la hoja está ya muy deshidratada se seca en estufa a 60 °C y se determina su peso seco. De esta manera podemos determinar durante el secado, el CRA a diversos niveles de humedad. Para representar las curvas P-V, en el eje de abscisas se insertan los valores de CRA obtenidos, mientras que en el de ordenadas los valores inversos de potencial foliar (1/ Ψ_{hoja}).

De esta forma, tanto la interpretación del diagrama de Höfler como de las curvas P-V pueden utilizarse para comprender las relaciones hídricas agua-planta durante el curso de un día.

A B C

Figura 3. (A) Detalle hoja cubierta para la medida de Ψ_{tallo}; (B) Cámara de presión de Scholander, y (C) detalle de microtensiómetro (FloraPulse Co., Davis, CA, USA) instalado en tronco de nectarino.

Movimiento del agua en la planta

De forma general, la dirección del movimiento del agua es hacía potenciales decrecientes, es decir, de Ψ altos (positivos) a otros más bajos (negativos).

La extensión y profundidad de las raíces son los factores principales que afectan a la extracción del agua en el suelo. La distribución de las raíces en profundidad depende fuertemente de factores de adaptación de las especies, pero también de las características del suelo en el que crecen las plantas. Así, por ejemplo, en suelos franco-arcillosos las raíces se encuentran en los primeros 60 cm de profundidad (Abrisqueta *et al.*, 2017). Asimismo, la presencia de raíces profundas es fundamental para asegurar una cierta absorción de agua durante las estaciones secas.

El continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC)

El concepto de continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC) analiza el flujo de agua en la planta como un proceso dinámico a lo largo de una serie de compartimentos, desde la fuente (suelo) hasta el sumidero final (atmósfera). Este modelo se basa en la propuesta de Van den Honert (1948) de aplicar la ley de Ohm al movimiento del agua a través de la planta, mediante el uso de conceptos derivados de la física de circuitos eléctricos. Asumiendo además que el flujo de agua a través de la planta es conservativo (es decir, que el agua transpirada por las hojas iguala a la absorbida por las raíces y transportada por el xilema), se asume que la resistencia total equivale a la suma de las resistencias parciales dispuestas en serie. De esta forma, el potencial hídrico del suelo o matricial, (Ψ_m), el potencial hídrico foliar (Ψ_h) y/o de tallo (Ψ_{tallo}), y el potencial hídrico de la atmósfera (Ψ_{atm}) que es función de la temperatura y de la humedad relativa (Nobel 1983), representan el flujo de agua total.

A modo de ejemplo, la Figura 4 representa el flujo del agua desde el suelo hasta la atmósfera en árboles de nectarino.

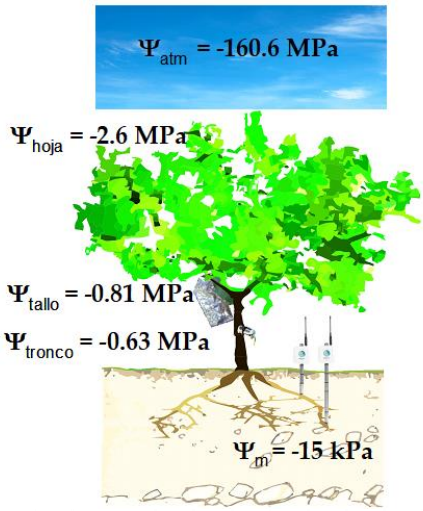


Figura 4. Ejemplo de potenciales en el continuo suelo-planta-atmósfera (Adaptado de Conesa *et al.*, 2023)

Como en todo el continuo, el flujo (F) a través del xilema en la planta estará afectado por la diferencia de presión entre los extremos, mediado por una constante de proporcionalidad K. Esta constante recibe el nombre de conductancia hidráulica. En su estimación tan sólo se considera la magnitud de la diferencia de presión (MPa) y conductividad hidráulica (K_h) si es expresado como gradiente de presión (MPa/m). En concreto, K_h nos define adecuadamente la cantidad de agua que puede atravesar una determinada estructura vegetal (raíz, tallo, hoja) por unidad de tiempo y gradiente de presión. En términos prácticos, cuanto mayor sea esta variable mejor será el abastecimiento de agua al resto de la planta a través del sistema conductor. Una planta con baja K_h genera potenciales muy negativos en las hojas ante situaciones que promuevan elevados flujos transpirativos. Ante esta situación, la hoja responderá regulando sus estomas, lo que reducirá el flujo transpirativo limitando la fotosíntesis. Finalmente, cuando una planta se ve obligada a cerrar los estomas, tanto por razones internas como por influencia del ambiente, sigue produciéndose flujo aunque de mucha menor importancia hacia la atmósfera.

2. Riego localizado por goteo

2.1. Situación actual en España

La superficie regada en España en el año 2022 fue de 3.771.107 ha, representando el riego por goteo el 55,75% del total (ESRCE, 2022). En los últimos años, el sistema de riego localizado es el que más ha aumentado al ser el más tecnificado, en detrimento de otros tipos de riego menos eficientes como el riego por gravedad. La distribución de la superficie de riego por goteo por comunidades autónomas respecto a la superficie de riego por goteo total indica que este sistema de riego se encuentra fundamentalmente en Andalucía (42,66%). A gran distancia se encuentran las Comunidades Autónomas de Castilla - La Mancha (18,58%), Comunidad Valenciana (9,69%), Extremadura (7,98%) y Región de Murcia (7,15%) (ESRCE, 2022). La distribución de superficie de cultivos en riego por goteo indica principalmente que es el sistema mayoritario en frutales, cítricos y no cítricos (por encima del 85%). El olivar y viñedo se riegan casi exclusivamente con riego localizado. Más del 95% de sus superficies regadas lo están bajo

esta modalidad. En el grupo de las hortalizas también destaca el sistema de riego localizado (52,57%), donde se incluye la superficie de invernadero (ESRCE, 2022).

2.2. Fundamentos técnicos

El riego localizado se fundamenta en la aplicación del agua de riego sobre el suelo o bajo él utilizando una red de tuberías a presión y emisores de agua que permiten solamente mojar una parte o partes del suelo más próximas a la planta. El agua aplicada por cada emisor moja un volumen de suelo determinado que se denomina bulbo húmedo. La aplicación del agua de riego y los fertilizantes se realiza en cantidades pequeñas y con alta frecuencia. De esta forma se intenta que el Θ_v se mantenga en niveles prácticamente constantes, evitando así grandes fluctuaciones, tal y como ocurre en otros sistemas de riego como la aspersión o el riego por gravedad, que a largo plazo pueden reducir la producción del cultivo. Este hecho permite que el agua de riego se encuentre en el suelo en condiciones óptimas para ser extraída por el cultivo.

El tipo de riego localizado se puede agrupar según el caudal que proporcionan los emisores de riego. Dentro del término 'riego por goteo' se engloba a todos los riegos localizados en los que se aplica un bajo caudal, utilizando para ello emisores denominados goteros, tuberías goteadoras o tuberías exudantes. (Gómez *et al*., 2010).

2.3. Importancia del diseño agronómico

El diseño de una instalación de riego localizado es de vital importancia, pues de ello dependerá el buen funcionamiento de todo el sistema de riego. El diseño agronómico hace referencia a los cálculos previos al diseño hidráulico que permitirán que la instalación de riego pueda satisfacer adecuadamente las necesidades hídricas del cultivo de estudio cuando éstas sean máximas. Además, el diseño agronómico ha de asegurar que la instalación es capaz de suministrar las necesidades de cultivo, mojando un volumen de suelo determinado para que el árbol se desarrolle adecuadamente. Así, el diseño agronómico debe responder a los siguientes interrogantes:

- ¿Cómo se debe aplicar el agua de riego?
- ¿Qué dosis de riego hay que aplicar?
- ¿Con qué frecuencia de riego?

La clave para un buen diseño agronómico está en fijar correctamente desde el principio las prestaciones que se exigirán posteriormente en la instalación, como son:

- Presión y características del sistema hidráulico.
- Caudal y, número de emisores necesarios, coeficiente de uniformidad adquirido, así como su disposición respecto al tronco del árbol y entre la línea porta-goteros.

Los errores en el diseño agronómico pueden tener consecuencias graves como pueden ser la salinización del suelo por falta de lavado, y/o la insuficiencia en el volumen humedecido por instalar un número de emisores equivocado o emisor inadecuado.

2.4. Factores a tener en cuenta en el diseño agronómico

El riego localizado es un sistema de alta frecuencia de aplicación, donde el agua se aplica sin tener que mojar toda la superficie (como pasa en el riego por gravedad o aspersión). Esto cambia la filosofía del riego, de manera que a menor superficie humectada hay que dar un mayor

número de riegos para que el árbol encuentre el agua que necesita. La aireación del suelo en este tipo de riego presenta muy pocos problemas ya que el suelo sólo queda saturado después de un riego en un volumen de suelo muy reducido.

A priori son necesarios una serie de datos de partida:

- Evapotranspiración de referencia y del cultivo.
- Necesidades netas de riego en periodo de máxima demanda ambiental.
- Necesidades totales de riego, teniendo en cuenta las necesidades de lavado de acuerdo a la calidad del agua riego.
- Coeficiente de uniformidad
- Porcentaje de suelo mojado.
- Profundidad esperada de raíces.
- Intervalo de riegos máximo y mínimo que se desea. Depende principalmente de la textura del suelo, con mayores valores en suelos arenosos y menores en suelos arcillosos.
- Marco de plantación
- Tipo de suelo, con especial hincapié en la textura.
- Tiempo de aplicación y/o frecuencia de riego.

2.5. Necesidades máximas de riego

Para realizar un correcto diseño agronómico debemos determinar las necesidades de agua del cultivo en la época que requiere mayor cantidad y en función de ese valor se determinaran los componentes de la instalación de riego. La instalación de riego debe estar preparada para poder abastecer la suficiente cantidad de agua de riego para el cultivo cuando sus necesidades hídricas sean máximas en estado adulto (en el caso de cultivos arbóreos suele coincidir con el mes de julio). La estimación del consumo de agua por parte del cultivo se determina a partir de evapotranspiración del cultivo (ET_c) que permite cuantificar la cantidad de agua que ha perdido un suelo en unas condiciones ambientales dadas por la presencia de un cultivo en un momento y desarrollo determinados. Para estimar la ET_c, se recurre a su vez al producto de dos componentes: una exclusivamente ambiental conocida como evapotranspiración de referencia (ET_0) y otra ligada al cultivo denominada coeficiente del cultivo (K_c). La ET_0 se puede calcular a partir de la fórmula de Penman-Monteith (Allen *et al*., 1998). Los valores de Kc de los diferentes cultivos se pueden obtener del documento de la FAO 56, cuadro nº 12 (http://www.fao.org), o bien de adaptaciones para distintos grupos de cultivos considerando tres fases de desarrollo (inicial, desarrollo, media y maduración). Particularmente en España, los datos climáticos y de evapotranspiración se pueden conseguir directamente a través de numerosos centros de asesoramiento al regante de cada comunidad autónoma (RiegosIVIA en la comunidad Valenciana, SIAM en la Región de Murcia, etc.), y también a través de instituciones públicas centrales como el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. La determinación necesidades netas y totales de riego, quedará ampliamente desarrollada en el Capítulo 2.2. Determinación de las necesidades hídricas.

2.6. Diseño agronómico en riego localizado

Una vez determinadas las necesidades de riego debemos determinar la disposición de emisores y laterales. En primer lugar, tenemos que tener en cuenta aquellos factores que pueden afectar a la forma y tamaño del bulbo húmedo.

Formación del bulbo húmedo

Se denomina bulbo húmedo al volumen de suelo humedecido por un emisor de riego localizado. El movimiento del agua en el suelo determina la forma y el tamaño del bulbo (volumen de suelo humedecido por un emisor) (Moya-Talents, 2017). La forma y el tamaño del bulbo depende de:

- Textura: En suelos arcillosos de textura fina, el agua se extienda en horizontal, rellenando todos los poros del suelo, con mayor facilidad hacia abajo. En suelos arenosos de textura gruesa, al tener poros de mayor tamaño, el agua circula hacia abajo en profundidad. (Figura 5)

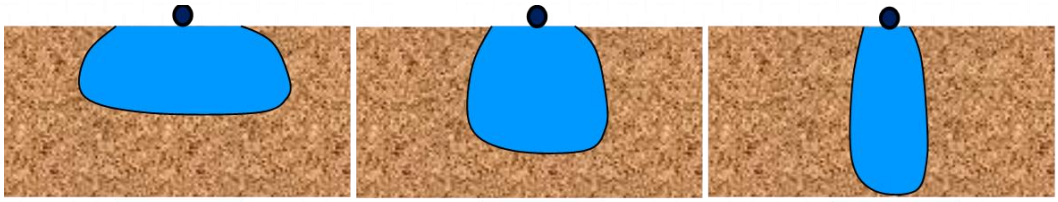


Figura 5. Forma del bulbo húmedo de acuerdo con la textura del terreno

- Caudal del emisor: A mayor caudal, mayor será la superficie humectada, siendo esta extensible en sentido horizontal.
- Tiempo de riego: A mayor tiempo de riego, mayor será la superficie humectada, siendo esta mayoritariamente extensible en profundidad.

Para que un bulbo moje adecuadamente un determinado volumen de suelo y el agua pueda ser adsorbida por el sistema radicular de la planta de manera correcta, es importante conocer cómo se extiende el bulbo horizontalmente. La extensión horizontal del bulbo no se puede aumentar indefinidamente incrementando el caudal del emisor o el tiempo de riego. Para conseguir una extensión de agua adecuada, hay que actuar sobre el número de emisores que sitúan en la proximidad de la planta. En este sentido para un mismo volumen de agua aplicado, el uso de un mayor número de emisores supone reducir las pérdidas por infiltración profunda y mejorar el reparto del agua y los fertilizantes (Monge, 2018). Al final de este capítulo se expondrán resultados de investigaciones realizadas a este respecto.

Caudal de los goteros

En general, el caudal del gotero más frecuentemente utilizado en cultivos leñosos suele ser de 4 L h^{-1} y la separación entre goteros de 1 m, mientras que en cultivos hortícolas la descarga está muy relacionada con la separación entre emisores. Rincón (2008) indica que para separaciones entre goteros de 20-30 cm el caudal unitario del emisor no suele superar 1 L h^{-1}, para separaciones de 30 - 40 cm los 2 L h^{-1} y a partir de 50 cm hasta los 60 cm los 2,5 L h^{-1}.

De acuerdo con la textura de suelo, se recomienda el uso de emisores con un caudal superior a 4 L h^{-1} en cultivos arbóreos con suelos de textura arenosa. En cultivos hortícolas se recomienda

de no pasar de los 3 L h^{-1}. En suelos arenosos, el agua tiende a ir directamente a las capas inferiores del suelo, por lo que utilizar goteros de más caudal forzará al agua a moverse para los lados. También es recomendable instalar un mayor número de goteros por planta o por unidad de superficie puesto que el movimiento del agua en estos terrenos es prácticamente vertical y queremos disminuir esa tendencia. Para evitar pérdidas por percolación, se reducirá el tiempo de riego y se aumentará la frecuencia. En cambio, para suelos arcillosos se emplearán un menor número de emisores por planta y con un caudal más bajo (≤ a 2 L h^{-1}) puesto que estos suelos tienen una mayor capacidad de retención de agua y el movimiento del agua predominante en el bulbo es horizontal.

En la actualidad, las nuevas tendencias van enfocadas a la utilización de emisores de bajo y ultra-bajo caudal (UBC) en frutales. Se parte de la premisa que varios estudios indican que el 50% de las raíces se concentran en los primeros 30 cm de profundidad, por lo que se debe favorecer una gran superficie mojada en la que predomine la componente horizontal en el bulbo húmedo. Esto se consigue con el uso de un gran número de emisores por planta con caudales en torno a 1 L h^{-1} o incluso inferiores. Por lo tanto, una propuesta alternativa a los diseños agronómicos tradicionales y partiendo de una caudal inicial de 32 L h^{-1} a partir de 8 emisores/planta de 4 L h^{-1}, podría ser de 16 emisores/planta de 2 L h^{-1} (suelo arcilloso) y de 32 emisores/planta de 1 L h^{-1} o 53 emisores/planta de 0,6 L h^{-1} (suelo arenoso).

Superficie mojada por el emisor

Las estimaciones de la superficie mojada por el emisor pueden hacerse de tres maneras: el uso de modelos teóricos, tablas y mediciones in situ. En el primer caso, la dificultad matemática introducida por el flujo de dos o tres dimensiones y la estratificación del suelo, hacen que los modelos existentes sean muy complejos (Karmeli *et al*., 1985). Las tablas existentes en la bibliografía o artículos científicos se basan sobre todo en datos medios en base a valores de texturas de suelo, pero son menos precisas dado que el movimiento del agua en el suelo no depende sólo de la textura (Keller *et al*., 1978). En teoría, la mejor manera de estimar el bulbo húmedo es mediante pruebas en campo, teniendo en cuenta el patrón de enraizamiento del cultivo a tratar. Para ello, conviene tener una idea aproximada de la dosis de riego y del caudal de los emisores a utilizar. Además, como requisito, es necesario que no exista solapamiento entre bulbos, es decir, hay que focalizar la atención en un solo emisor y su bulbo húmedo correspondiente (Tabla 3).

Tabla 3. Ejemplo de datos de una prueba de campo a partir de un emisor de 2L h-1. Ve: Volumen descarga emisor. Pr: Profundidad. R: Radio.

Ve (L)	Pr (cm)	R (cm)	R/Pr
2	28	23	0,82
5	42	33	0,79
8	65	50	0,77
12	88	68	0,77
16	114	87	0,76

Sin embargo, a efectos prácticos de diseño, se suelen utilizar tablas o gráficas que integran los resultados derivados de pruebas de campo realizadas en suelos de diferente clase textural (Tabla

4), la experiencia local o modelos de predicción de las dimensiones del volumen humedecido por un emisor.

Tabla 4. Diámetros mojados por el emisor según la textura del suelo y tipo de cultivo. (D es el diámetro de la superficie mojada (en m); q es el caudal del emisor (L h^{-1}))

Textura principal del suelo	Diámetro de la superficie mojada por el emisor (Cultivos leñosos)	Diámetro de la superficie mojada por el emisor (Cultivos hortícolas)
Arcillosa	$\mathrm{D} = (1{,}2 + 0{,}10 \times q) \times 0{,}98$	$\mathrm{D} = (1{,}2 + 0{,}10 \times q) \times 0{,}95$
Limosa	$\mathrm{D} = (0{,}7 + 0{,}11 \times q) \times 0{,}96$	$\mathrm{D} = (0{,}7 + 0{,}11 \times q) \times 0{,}90$
Arenosa	$\mathrm{D} = (0{,}3 + 0{,}12 \times q) \times 0{,}93$	$\mathrm{D} = (0{,}3 + 0{,}12 \times q) \times 0{,}85$

Fuente: Adaptado de las expresiones de Karmeli et al., 1985

Volumen de suelo humedecido o porcentaje de suelo mojado

En riego localizado el agua de riego se aporta únicamente a una parte del suelo, por lo que a efectos del diseño agronómico se debe establecer un mínimo de volumen de suelo a humedecer, que pueda satisfacer al cultivo el suministro de agua para su correcto desarrollo. En la práctica del diseño, el concepto de volumen humedecido se sustituye por el de porcentaje de suelo mojado (P). Este porcentaje es la relación entre el área mojada por los emisores y el área total de cultivo (marco de plantación) y suele expresarse en porcentaje.

La superficie mojada por el emisor se debe medir a unos 30-35 cm de profundidad, aunque en el caso de raíces poco profundas podría hacerse a 15 o 20 cm. En cambio, Rodrigo *et al*. (1992) recomienda que las medidas se realicen a la profundidad donde se encuentre la máxima densidad radicular. Desde el punto de vista práctico, los valores orientativos de P con fines de diseño serían los siguientes:

Tabla 5. Porcentaje de superficie de terreno humedecida según el tipo de plantación (P)

Tipo de cultivo	Porcentaje de suelo húmedo (P)
Leñosos con marco de plantación amplio (Distancia entre plantas > 4 m)	30%-40%
Cultivos con marco de plantación medio (Distancia entre plantas ≤ 4 m)	35%-55%
Hortícolas y herbáceos	60%-80%

Fuente: Monge, 2018

Los valores altos de P aumentan la seguridad del sistema (casos de averías o días de evaporación extrema, al objeto de evitar o al menos mitigar la existencia de estrés hídrico en planta), pero también aumentan el coste de la instalación (a mayor número de emisores, mayor caudal de circulación, etc.). Independientemente de ello, el sistema de riego localizado se deberá diseñar para satisfacer el porcentaje de suelo mojado deseado. Un aspecto adicional para considerar es que la distribución localizada del agua debe ser altamente uniforme con el objeto de no incrementar el consumo de agua y afectar al desarrollo de las plantas. Estudios realizados en diferentes cultivos relacionan el porcentaje de suelo mojado con la producción y calidad de los frutos y en general es aceptado que un sistema de riego por goteo debe humedecer una superficie mínima de 25-30% de su marco de plantación (Gispert, 2008).

Disposiciones generales de los goteros en el cultivo

En el caso de cultivos leñosos, lo más típico, es emplear goteros agrupados en la tubería lateral de manera que de forma una franja húmeda discontinua (Figura 6). Estas franjas húmedas pueden ser simples (en cultivos arbóreos con marcos de plantación amplios) (Figura 6A) o franjas húmedas dobles, apropiado para cultivos arbóreos con sistemas radiculares superficiales (Figura 6B). Las nuevas tendencias en la disposición de goteros, principalmente en cultivos arbóreos con un sistema radicular superficial, como puede ser el aguacate, es a la implantación de tres líneas portagoteros (Figura 6C) (o incluso más) con emisores de bajo caudal.

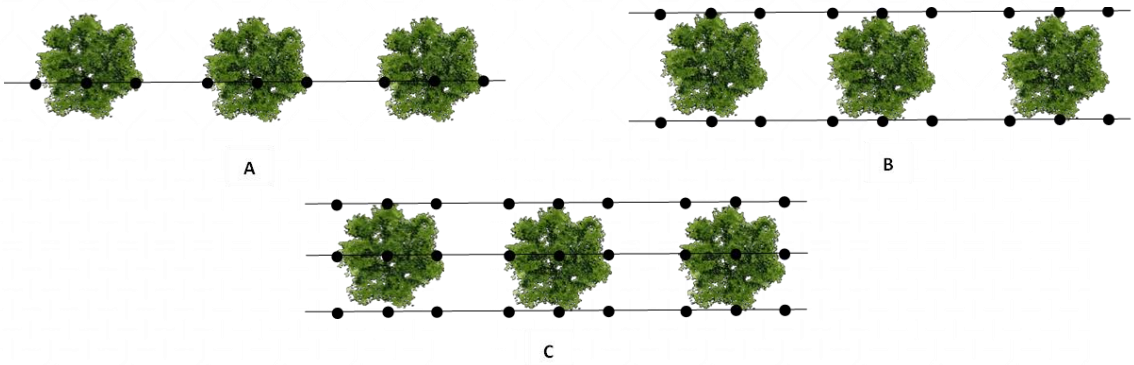


Figura 6. Disposición de goteros en línea lateral. Línea portagoteros con franja de humedad simple (A); línea portagoteros con doble franja de humedad (B); línea portagoteros con triple franja de humedad (C)

Para cultivos hortícolas y herbáceos, se suele emplear principalmente una línea o franja de humedad continua a lo largo de la cual las plantas desarrollan su sistema radicular.

Determinación del número de emisores por planta

En cultivos leñosos, debido a la extensión de su sistema radicular precisarán un mayor volumen de suelo humedecido necesitando más de un gotero por árbol. Para determinar el número de emisores mínimo por árbol debemos relacionar la superficie que debe humedecerse para regar el árbol de forma eficiente con la superficie que mojan los goteros a una profundidad determinada. Posteriormente, el diseñador agronómico puede realizar varias estimaciones, aumentado el porcentaje de superficie humedecida (P), variar el número de goteros, caudal y diámetro mojado de los mismos, etc., al objeto de disponer varios diseños. Cabe destacar que a mayores implementaciones en el diseño agronómico (un número de goteros superior al mínimo calculado o incrementar las mangueras portagoteros suponen mayores costes que deben ser evaluados y que al final el beneficio económico obtenido por el cultivo sea superior a dichos costes). El número de emisores mínimo podría determinarse:

$$e_t \geq \frac{P \times S}{S_{me}}$$

Donde:

- e_t, es el número mínimo de emisores por árbol
- S, es el marco de plantación (m^2)
- P, es el porcentaje de superficie humedecida, transformado en decimal.
- S_{me}, es la superficie mojada por un emisor (m^2), siendo D el diámetro mojado por un gotero

$$Sme = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

En cambio, para cultivos hortícolas y herbáceos, se suelen regar con una franja de humedad continua a lo largo de la línea, por lo que habrá varias plantas regadas por un mismo emisor. En este caso, las ecuaciones para su determinación están disponibles en la bibliografía (Monge, 2018).

Solape de bulbos húmedos

Con el objeto de crear bandas húmedas continuas y facilitar el movimiento de sales se debe satisfacer un determinado solape (s) entre bulbos contiguos. Los porcentajes de solape (a) entre los volúmenes mojados por los emisores deben oscilar entre un 15% como mínimo y el 30% (Rodrigo *et al*., 1992). Se recomienda no superar el 50% principalmente por razones económicas (Monge, 2018). Los porcentajes más altos se utilizarán cuando se emplean aguas de elevada salinidad. El solape se define como el porcentaje de distancia recubierta por dos bulbos consecutivos con relación al radio del bulbo (Figura 7).

$$S = \frac{a}{r} \times 100$$

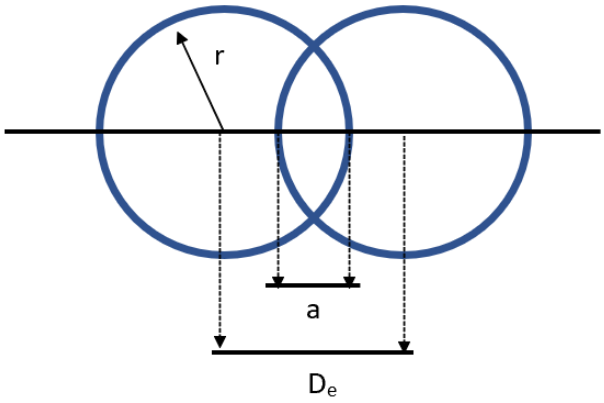


Figura 7. Separación de emisores (De) y grado de solapamiento (a) entre bulbos húmedos. r= radio del bulbo húmedo

Donde:

S, es el solape expresado en tanto por 100

a, es la distancia recubierta por dos bulbos consecutivos en metros

r, es el radio del bulbo húmedo en metros

La superficie que se solapa (a) se define como: $a = \frac{S \times r}{100}$

La separación de emisores (De) de la Figura 7:

$$D_e = r \times \left(2 - \frac{S}{100}\right)$$

Donde:

- De, es la distancia entre goteros, en centímetros

- r, es el radio húmedo del gotero en centímetros (Tabla 4)
- S, es el solape en porcentaje

Intervalo entre riegos

El intervalo entre riegos es el tiempo transcurrido entre la aplicación de un riego y el siguiente. En la práctica pueden oscilar entre varios riegos al día, hasta intervalos de riego de 3 o cuatro días. El tiempo entre riegos no va a depender solamente del cultivo, también de la relación existente entre el suelo, planta, clima y calidad del agua Gómez *et al*., 2010. Para un cultivo existente, el riego será más frecuente:

- Cuanto menos profundo sea el suelo.
- Cuanto menor sea su capacidad de retención de agua (suelo textura arenosa).
- Cuando mayor sea la evapotranspiración del cultivo.
- Cuanto peor sea la calidad del agua de riego.

En relación con la textura del suelo, en general, los suelos de textura arenosa suelen presentar bulbos estrechos y profundos por lo que se regara a intervalos muy cortos (uno o dos riegos diarios). En cambio, para suelos de textura arcillosa se regará a intervalos más largos (tres o cuatro días de riego por semana) (Tabla 4).

Tabla 6. Intervalo entre riegos general de acuerdo con la textura del suelo

Tipo de terreno	Intervalo entre riegos
Arcilloso	1 riego cada 2 o 3 días
Limoso	1 riego cada día
Arenoso	1 o 2 riegos diarios

Fuente: Monge, 2018

En la actualidad, con el uso cada vez más frecuente de sondas a diferentes profundidades para determinar la humedad del suelo, nos va a permitir un mejor ajuste tanto del intervalo como de los tiempos de riego.

2.7. Tendencias e investigaciones acerca del diseño agronómico en riego por goteo

Se presentan tres casos prácticos comparando diferentes diseños agronómicos en riego localizado llevados a cabo en la zona del levante español. Las investigaciones en este sentido indican resultados dispares, que pueden estar relacionados con diferentes factores. La especie, variedades de recolección temprana o tardía dentro de la misma especie, recolecciones en un sólo corte o en varios cortes, tipo de suelo, calidad del agua de riego utilizada, etc., son factores a tener en cuenta y que implican con la continuidad de ensayos en esta materia.

Caso nº 1: Doble lateral vs. Manguera simple en nectarino extra-temprano

Tradicionalmente, en cultivos frutales se utiliza el diseño agronómico de doble línea de emisores de acuerdo con facilitar un solapamiento de bulbo que permita un correcto lavado de sales. De esta forma, para un mismo tiempo de riego, se duplica la zona humedecida en relación con el diseño agronómico con una única línea de emisores. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la utilización de la de doble línea de emisores vs. una única línea de emisores por

hilera de árboles, sobre la en la producción y calidad de nectarinos extratempranos cv. 'Flariba' (recolección primera semana de mayo) ubicados en la Estación Experimental del CEBAS-CSIC (Santomera, Murcia) durante 7 campañas agrícolas consecutivas (Conesa *et al*., 2021). Se aplicaron dos diseños agronómicos diferentes: uno consistente en una línea de emisores por hilera de árboles con 4 emisores de 4 L h^{-1} (línea simple, LS) y otro, con dos líneas de emisores por hilera de árboles con 8 emisores de 4 L h^{-1} cada uno 1 (línea doble, LD). En ambos casos los emisores estaban situados a 0,5 y 1,3 m respecto al tronco principal del árbol. En el tratamiento LD, la separación de mangas de riego era de 1 m (Figura 8). Se utilizaron sensores capacitivos instalados a diferentes profundidades y cámara de presión para controlar el estado hídrico del suelo (a partir de medidas de θ_v) y la planta (a partir de medidas de Ψ_{tallo}). Se controlaron parámetros productivos y calidad de la cosecha en cada campaña agrícola.

Como resultados, si bien el volumen de riego medio aplicado de los 7 años fue el mismo en LS y LD (= 5000 m^3 ha^{-1}), el tratamiento LD manifestó un leve déficit hídrico ligero (no significativo) durante la postcosecha del nectarino, con una disminución respecto a LS de $\Psi_{t,md}$ de 0,15 MPa y del 10% de θ_v en la zona radicular activa, probablemente debido a un sistema radical más superficial y expuesto a una elevada demanda hídrica. No obstante, no se observaron ni tendencias ni diferencias significativas en los parámetros productivos y de calidad del fruto entre ambos tratamientos. En definitiva, tras 7 años de estudio, los resultados obtenidos no mostraron ninguna ventaja de la instalación de una doble línea de emisores en frutales de hueso, lo que indica que utilizar una línea simple permite obtener una producción y calidad similares que una línea doble con un menor costo inicial del equipamiento.

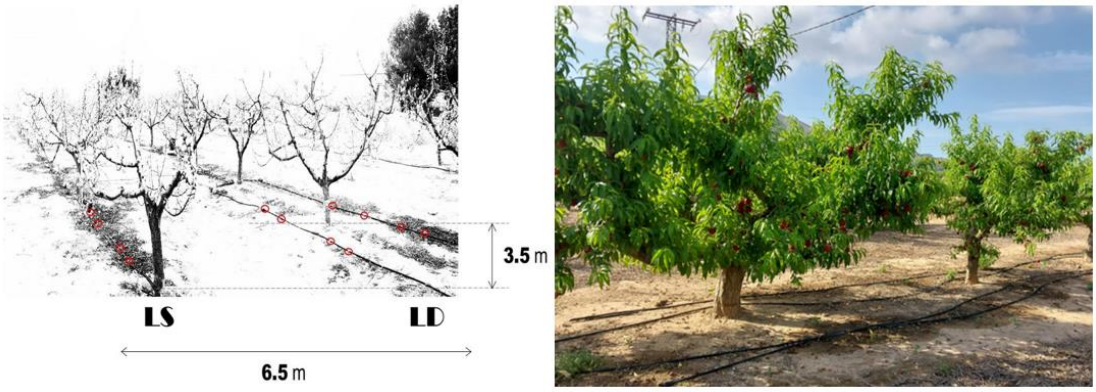


Figura 8. Disposición de emisores en nectarinos extratempranos cv. 'Flariba' y detalle de la instalación de la doble manguera en la parcela experimental

Caso nº 2: Doble lateral vs. Triple lateral en limonero temprano 'Fino 49'

Se comparó durante tres campañas la respuesta agronómica de dos diseños de sistemas de riego por goteo en árboles adultos de limonero de recolección temprana 'Fino 49' (*Citrus limon* [L.] Burm. fil.) injertados sobre el patrón *Citrus macrophylla* Wester. El agua de riego utilizada fue de buena calidad con una conductividad eléctrica de 1,28 dS m^{-1}. Los sistemas de riego consistieron en diferentes diseños de la instalación de riego: un diseño convencional (2L, dos líneas de portagoteros con seis goteros por árbol de 3,5 L h^{-1}), y un diseño con mayor superficie mojada (3L, implementando el diseño convencional con una tercera línea portagoteros con un total de nueve goteros por árbol) (Figura 9). En ambos tratamientos se aplicó la misma cantidad

de agua y frecuencia de riego, solamente se modificó el tiempo de riego en el tratamiento con un mayor número de goteros (Robles *et al*., 2023).

Los resultados indicaron que el diseño 3L promovió una mejor distribución de agua y fertilizantes en el perfil del suelo, principalmente en el perfil de 0-50 cm donde se localiza la mayor actividad radicular, reduciendo las posibles pérdidas por percolación. Esto se tradujo en una mejora de determinados parámetros de intercambio gaseoso, principalmente en períodos de baja demanda de evaporación o después de la lluvia.

La respuesta agronómica mostró que la producción total fue similar entre ambos tratamientos. Sin embargo, analizando los cortes de limón realizados (2 cortes), se apreció un incremento significativo de la producción en el primer corte en el tratamiento 3L, además de una reducción de los frutos afectados por 'endoxerosis'. Desde el punto de vista económico, la productividad económica del agua aumentó, principalmente por un incremento en la proporción de limón en el primer corte, que son los que presentan un mayor valor económico, pero también por la disminución del limón producido para la industria (afectado por 'endoxerosis'). El sistema de riego 3L podría ser una alternativa interesante para favorecer la precocidad del fruto, mejorando el aprovechamiento de los recursos hídricos disponibles para los productores precoces de limón.

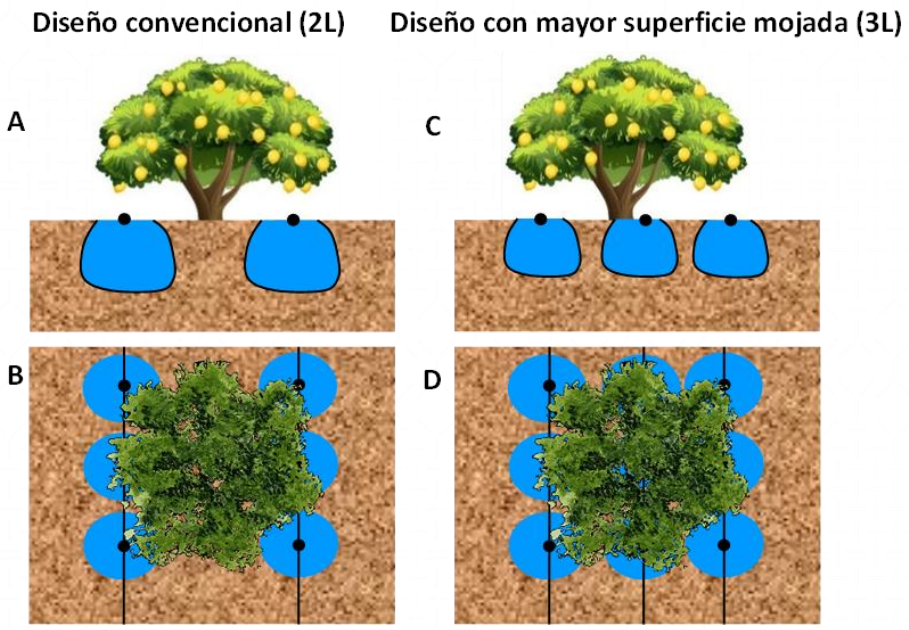


Figura 9. Disposición de cada diseño de riego. Diseño convencional 2L (doble línea portagoteros) y 3L (triple línea portagoteros). Figuras A y C (Sección transversal de los diseños comparados). Figuras B y D (Vista en planta de los diseños comparados)

Caso nº 3: Diseños agronómicos más eficientes en aguacate

Los beneficios de la aplicación de diseños agronómicos favorecedores de una mayor superficie mojada se pusieron de manifiesto en un ensayo de riego en aguacate adulto, variedad 'Hass' en Callosa d'en Sarrià, Alicante (España). En este ensayo se contrastó el efecto sobre la productividad del cultivo de la utilización de un sistema de riego basado en 10 emisores por árbol de 4 L h-1 dispuestos en dos tuberías portaemisores frente a un diseño orientado a aumentar la superficie mojada, basado en la instalación de 36 emisores por árbol de 1 L h^{-1}

dispuestos en tres líneas portaemisores. El ensayo se desarrolló durante dos campañas, 2018/19 y 2019/20.

Partiendo de unas cantidades de agua de base según la metodología FAO56, en cada uno de los diseños descritos se aplicó la misma dosis de riego, 6.000 m^3 ha^{-1} de media por campaña, si bien con un fraccionamiento diferente (duración del riego y frecuencia semanal) resultado de la interpretación de la información del estado y evolución de la humedad del suelo a cuatro profundidades; 10, 30, 50 y 70 cm, obtenida por equipos de sensorización de tipo capacitivo. La información de los sensores de humedad permitió concentrar el agua de riego en la zona radicular, manteniendo unos niveles adecuados para la planta y evitando las pérdidas en profundidad.

Complementariamente a la información de la humedad del suelo, se efectuó el seguimiento del estado hídrico de la plantación mediante medida periódica con cámara de presión del potencial hídrico de tallo a mediodía. Asimismo, simultáneamente a las medidas de potencial hídrico, se efectuaron medidas de intercambio de gases a fin de caracterizar ecofisiológicamente el cultivo. Las medidas de estado hídrico del cultivo no mostraron dinámicas diferentes entre tratamientos, encontrándose el potencial hídrico de tallo entre los umbrales considerados óptimos para este cultivo. Sin embargo, las medidas de intercambio de gases, especialmente la conductancia estomática medida en momentos de mayor exigencia ambiental, mostraron que en el tratamiento con 10 emisores el cultivo reducía su apertura estomática aparentemente como estrategia de defensa frente a la deshidratación, mientras que el tratamiento con 36 emisores por árbol mantenía tasas de conductancia elevadas, permitiendo así condiciones favorables tanto para la refrigeración de la masa foliar como para el mantenimiento de la actividad fotosintética.

El resultado tras dos campañas fue que la mayor superficie mojada indujo a unos niveles productivos significativamente superiores al diseño con menor número de emisores. Frente a una producción media de 8,4 t ha^{-1} del tratamiento con 10 emisores por árbol, el tratamiento con 36 emisores produjo, en contraposición, 15,5 t ha^{-1}. La causa de esta diferencia cabe encontrarla más en los frutos presentes en el árbol en el momento de la recolección antes que en diferencias en el calibre del fruto, ya que en el tratamiento de 36 emisores se encontraron un 41% más de frutos respecto del tratamiento con 10 emisores, superiores en calibre un escaso 10 %.

En definitiva, este ensayo mostró las ventajas productivas que determina la aplicación del agua de riego utilizando diseños agronómicos favorecedores de una mayor superficie mojada, en cultivos muy exigentes en la adecuación del régimen hídrico aplicado como el aguacate sometido además a unas condiciones de cultivo muy demandantes, como son las mediterráneas.

3. Riego localizado subterráneo

3.1. Concepto de riego localizado subterráneo

El riego localizado subterráneo (RLS) es una variante del riego por goteo que se basa en aportar el agua y los fertilizantes directamente a las raíces del cultivo mediante un sistema de tuberías y emisores enterrados bajo la superficie del suelo. Este sistema es una opción adecuada para aquellos agricultores que buscan maximizar aún más la eficiencia en el uso del agua (Camp *et*

al., 2000; Ayar *et al.,* 2015; Rodríguez y Gil., 2012). En este sentido, el principal aspecto diferenciador del RLS con otros sistemas de riego es la minimización de las pérdidas de agua del suelo por evaporación (Figura 10). El riego por inundación y aspersión presenta unas elevadas pérdidas por evaporación que oscilan entre el 30-50%. En cambio, en el riego por goteo superficial las perdidas por evaporación son bastante menores y oscilan entre un 8-25%. En cambio, en el RLS las perdidas por evaporación pueden llegar a ser nulas si está bien gestionado (Lamm y Rogers, 2012).

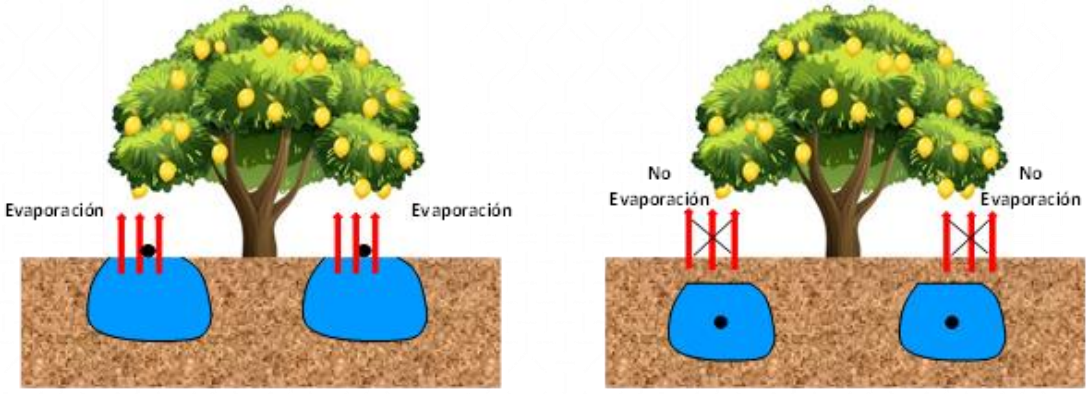


Figura 10. Esquema comparativo entre riego por goteo superficial (izquierda) y riego por goteo subterráneo (derecha)

En los últimos años, este sistema ha experimentado un notable avance principalmente porque presenta una serie de ventajas para el agricultor en comparación con el tradicional riego por goteo (Lamm *et al*., 2010). Se produce una reducción del consumo de agua y fertilizantes, que radica fundamentalmente por evitar las perdidas principalmente por evaporación y también por escorrentía superficial los que conlleva en un mayor incremento de la eficiencia en el uso del agua. Se facilita el uso de aguas residuales, ayudando a cumplir los criterios de reutilización de aguas depuradas para el riego (Real Decreto 1620/2007), relativo al uso previsto en función de la calidad del agua al reducir el contacto de las partes aéreas del cultivo con el agua de riego. Ausencia de elementos de la instalación de riego en la superficie del suelo, lo que permite facilitar las labores sobre el cultivo durante todo el ciclo de este, evitando desplazamientos de la tubería emisora y roturas de goteros. También dificulta el acceso a la tubería portagoteros a alimañas que puedan provocar roturas. Se reduce el vandalismo, evitando posibles robos de material de riego o alteraciones no deseadas de la instalación de riego. Se alarga la vida útil de la instalación de riego, principalmente goteros y líneas portagoteros, al no estar expuesta a la radicación solar, además de, no distorsionar el paisaje donde se instale (Martínez y Reca, 2014). Se reduce la incidencia de enfermedades fúngicas, cuya propagación este favorecida por la presencia de agua en la superficie del suelo. El contacto de ésta con frutos o partes vegetativas del cultivo favorecería su propagación. Manejando adecuadamente el RLS se disminuye la presencia de malas hierbas, con el consiguiente ahorro, por un lado, en el uso de herbicidas, y por otro, en mano de obra para la aplicación de estos o en el uso de desbrozadora. Dicha reducción en la aparición de malas hierbas puede fomentar el uso de técnicas de no laboreo o el uso de cubierta vegetales que reducirían los efectos perjudiciales de la erosión del suelo.

Sin embargo, hay que tener en cuenta una serie de inconvenientes en el uso del RLS, destacando unas mayores necesidades de asesoramiento especializado, tanto en el manejo de esta como en el mantenimiento, para un correcto funcionamiento de la instalación. También se necesitan

mayores requerimientos en la instalación que el sistema de riego localizado por goteo superficial. En la instalación del RLS necesita un adecuado sistema de filtrado para evitar especialmente las obturaciones de los goteros. Además, se requiere de la inyección de productos químicos (ácido nítrico, peróxido de hidrógeno, etc.) en el sistema para un adecuado mantenimiento de la instalación. Un mal manejo de la instalación puede dar lugar a un exceso de agua en la zona de las raíces, pudiendo causar condiciones temporales de hipoxia o anoxia (Colaizzi *et al*., 2004). Posiblemente sea necesario la aplicación puntual de herbicidas (autorizados en el cultivo) en el interior de la instalación de riego con el objetivo de evitar la entrada de pelos radiculares en los emisores. (Schifris *et al*., 2015). Resulta fundamental la colocación de contadores para detectar posibles averías, obturaciones etc. así como, ventosas y válvulas de drenaje para un correcto funcionamiento de la instalación. En relación con el cambio del riego localizado superficial a RLS, es recomendable en cultivos arbóreos, para evitar situaciones temporales de estrés hídrico, consecuencia de roturas en el sistema radicular al instalar el RLS, utilizar ambos sistemas, al menos, el año que se realiza el cambio de sistema, mientras el cultivo se va adaptando a la situación final de RLS.

3.2. Consideraciones en la instalación del riego localizado subterráneo

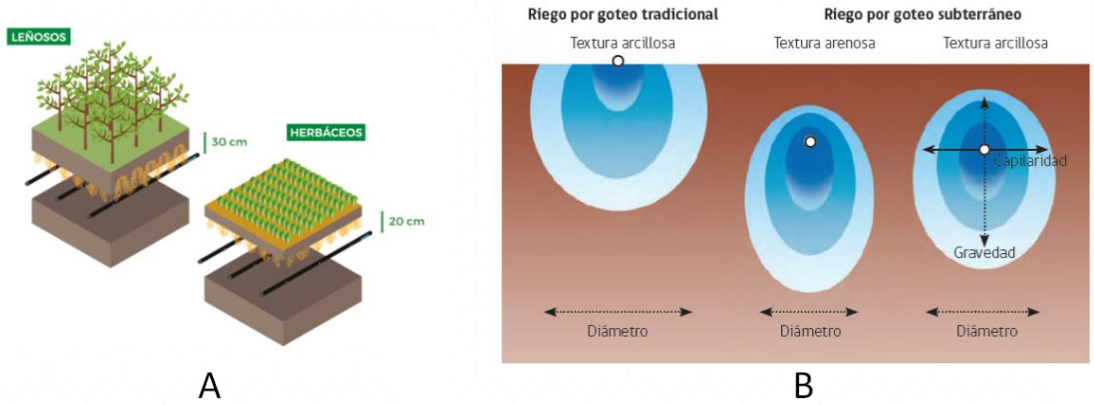


Figura 11. Esquema general de la profundidad de instalación de manguera para RLS en cultivos leñosos y hortícolas (A). Fuente: Jornada de riego localizado subterráneo (RLS). Servicio de Formación y Transferencia Tecnológica de CARM. Bulbo húmedo bajo el emisor en riego por goteo superficial y subterráneo bajo dos tipos de suelo (B). Fuente: Ivelic *et al,* 2022

El RLS puede aplicarse tanto a cultivos herbáceos como a leñosos, teniendo en cuenta las peculiaridades específicas de cada cultivo. Dependiendo del tipo de labores, cultivo y textura del suelo, etc. la profundidad a la que se recomienda enterrar la tubería en cultivos leñosos seria donde se encuentre el mayor porcentaje radicular (30 cm) y en cultivos hortícolas no superar los 20 cm (Figura 11a), de manera que se garantice el aporte del agua de riego en esa zona. En cultivos arbóreos principalmente, se suelen instalar una, dos o incluso más líneas portagoteros por fila de cultivo para garantizar a la planta un volumen óptimo de suelo humedecido. Para ello, es recomendable realizar un estudio agronómico preliminar teniendo en cuenta el tipo de suelo (Figura 11b) y los requerimientos hídricos del cultivo para determinar el número de líneas a colocar como la separación entre goteros adecuada para conseguir una franja de humedad continua y uniforme que ayude a minimizar el riego de intrusión radicular al interior del gotero.

La instalación debe realizarse con aperos especiales (subsolador adaptado), principalmente en cultivos leñosos (Figura 12a) ubicando la manguera portagoteros a la profundidad con mayor actividad radicular (Figura 12b).

A B

Figura 12. Instalación de tubería de riego subterráneo en parcela de olivar (A). Detalle del sistema radicular con la instalación de la manguera portagoteros en riego subterráneo (B)

3.3. Componentes en la instalación del riego localizado subterráneo

La instalación del RLS requiere de una serie de elementos en el cabezal de riego y en parcela, siendo algunos de ellos comunes con una instalación de riego por goteo superficial (Capítulo 2.4. Tecnología del riego) y otros más específicos (Figura 13).

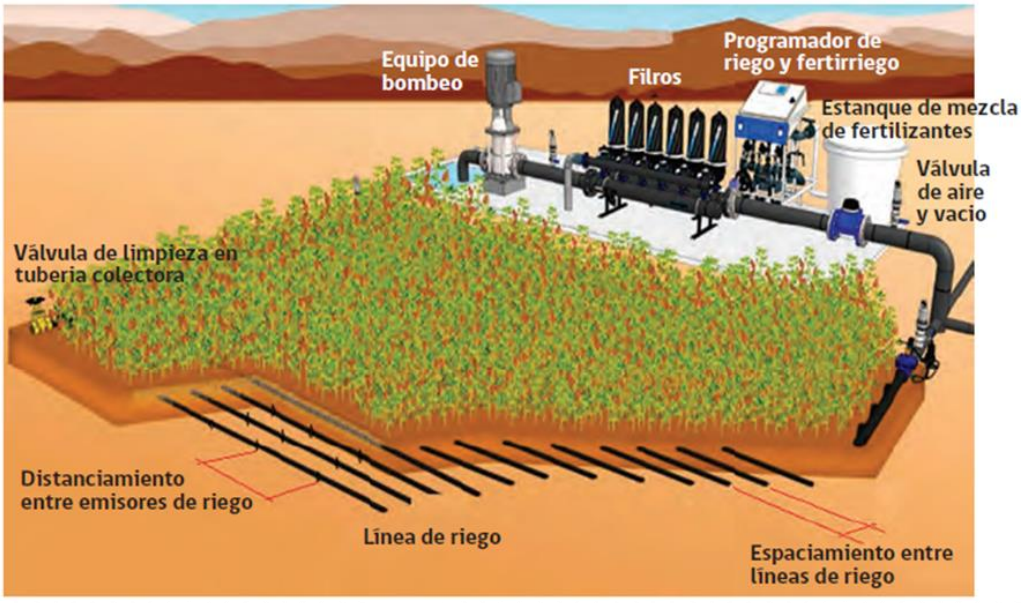


Figura 13. Esquema general del sistema de riego subterráneo automatizado. Fuente: Ivelic *et al*, 2022

En el caso del cabezal de riego, además de los elementos indicados en la Figura 13 resulta necesario:

- Contadores y/o caudalímetros.
- Equipo de inyección de productos especiales (H_2O_2, herbicidas, etc.).

Los principales componentes esenciales en la instalación del RLS en campo:

- **Emisores específicos para RLS**, diseñados para funcionar bajo tierra de manera duradera. Los goteros deben ser autocompensantes, ya que presentan un flujo de agua

constante entre un intervalo de presiones, lo que nos permite conseguir un riego con un elevado coeficiente de uniformidad. Los goteros tienen que ser con efecto antisucción, que impidan los flujos de agua en sentido inverso que podría arrastrar partículas hacia el interior del gotero y provocar obturaciones. Los goteros deben presentar un diseño antiraíces, de manera que dificulten su entrada al interior. Deben ser resistentes a la obturación que podría producirse por la acumulación de partículas en su interior que han superado el filtro autolimpiante, o bien por minerales precipitados en su interior que han sido transportados en el agua de riego.

- **Colectores de drenaje al final de la línea** que nos permitirán evacuar periódicamente la suciedad acumulada periódicamente en el interior de las tuberías portagoteros.
- **Medidores de presión y ventosas**, al igual que en una instalación de riego localizado.
- **Sondas de humedad del suelo**, que resultan muy recomendables para determinar la zona del perfil del suelo de extracción de agua por las raíces. Esto nos va a permitir adecuar la programación para que sea más eficiente evitando pérdidas de agua por lixiviación.

3.4. Mantenimiento general de instalaciones en riego localizado subterráneo

Principalmente se debe realizar un seguimiento de los contadores y/o caudalímetros y de los valores de presión de la red hidráulica de la finca con el objeto de verificar que la instalación está funcionando correctamente dentro de los valores de diseño que se establecieron cuando se realizó. Una variación del caudal teórico o de las presiones existentes puede ser indicativo de un problema por obturación de goteros y alertar de la necesidad de ciertas labores de mantenimiento. Dichas labores varían en función de factores como la calidad del agua, frecuencia de riego, fertilización, diseño de la instalación etc. Especialmente se requiere limpieza mecánica de los ramales portagoteros con relativa frecuencia y tratamientos a base de soluciones ácidas y/o antioxidantes para evitar la acumulación de partículas y precipitados en la red de tuberías de la instalación de la finca.

3.5. Tendencias e investigaciones acerca del riego localizado subterráneo

En condiciones edafoclimáticas del levante español, se han realizado varios estudios en cultivos arbóreos sobre la idoneidad del RLS. En almendro, Romero *et al*. (2004 a y b), han indicado que el uso del riego subterráneo permite una mejora de la eficiencia en el uso del agua siendo una alternativa a tener en cuenta bajo condiciones de infradotación hídrica. Además, el uso del riego deficitario controlado (RDC) en condiciones de riego subterráneo durante el llenado del grano y en poscosecha puede considerarse económicamente apropiada en esas condiciones para ahorrar agua y mejorar la eficiencia del uso del agua (Romero *et al*., 2006b). Montoya *et al*., 2022 ponen de manifiesto que el uso del sistema de RLS se puede considerar una estrategia sostenible para el riego del almendro, reduciendo el consumo y aumentando la productividad del agua de riego.

En el caso concreto de los cítricos, Primo Millo *et al.* (2002) evaluaron la respuesta de sistemas de riego a goteo (superficial y subterráneo) con tres dosis de riego (75, 60 y 45% de la ET_c) en árboles adultos de mandarino 'Clemenules'. Las principales conclusiones obtenidas fueron que la dosis de agua aplicada en el sistema de riego apena afectó a los cambios estacionales de concentración foliar de N así como al resto de nutrientes. El sistema subterráneo presentó una mayor producción, mejorando la eficiencia en el uso del agua, el tamaño y el color del fruto

respecto al sistema superficial bajo dosis de riego muy deficitarias (45% de ET_c). Además, para una misma dosis de riego, el sistema subterráneo aumentó la intensidad del color del fruto (más anaranjado) y el índice de madurez, lo que supondría un adelanto en la fecha de recolección. En otro estudio llevado a cabo en mandarino 'Clemenules' se evaluaron en dos sistemas de riego por goteo (superficial y subterráneo) y tres dosis de riego (100% ET_c, 85% ET_c y 70% ET_c) y dos dosis de nitrógeno (350 y 550 g árbol^{-1} año^{-1}) (Montaña *et al.,* 2005). Como resultados relevantes, se observó que los árboles cultivados con el sistema de riego por goteo subterráneo tuvieron valores más elevados de N en hoja y un mayor crecimiento estacional del fruto, con independencia de la dosis de riego aplicada y la cantidad de nitrógeno. Además, la producción de los árboles del sistema de riego subterráneo fue superior a la del sistema superficial únicamente cuando se aplicaron dosis bajas de agua.

Legaz *et al*. (2010) evaluaron la respuesta de árboles de mandarino 'Clemenules' regados mediante dos sistemas de riego por goteo (superficial y subterráneo) en condiciones de riego deficitario. En este caso, la producción de los árboles regados con el sistema de riego por goteo subterráneo fue un 25% más elevada comparada con el sistema de riego superficial, sin observar cambios en la calidad comercial de los frutos. Quiñones *et al*. (2012) presentaron la evolución del experimento anterior a largo plazo (durante cuatro campañas) desde 2007 a 2010, con similares conclusiones, indicando que el sistema de riego por goteo subterráneo aumentó la producción, y por lo tanto mejoró la eficiencia en el uso del agua. En cítricos RLS ha permitido conseguir ahorros de agua de riego comprendidos entre el 15-25% debido principalmente a la eliminación de la componente evaporativa del riego sin afectar al rendimiento ni a la calidad del fruto. (Martínez-Gimeno *et al*., 2018; Robles *et al*., 2018).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con proyectos del Ministerio de Ciencia e Innovación (PID2019–106226RB-C2 1/AEI/10.13039/501100011033 y PID2023-147690OB-I00), y el programa AGROALNEXT del MCI−NextGenerationEU (PRTR−C17.I1) y Fundación Séneca−Región de Murcia; además del proyecto europeo PRIMA "HANDYWATER", a través del programa nacional "Proyectos de Colaboración Internacional" (PCI2021-121940) financiado por MCIN/AEI/10.13039/5011000110033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR. M.R. Conesa agradece al programa postdoctoral Juan de la Cierva (FJCI-2017-32045 y IJC2020-045450-I) financiado por el MCIN/AEI/10.13039/501100011033 y fondos europeos NextGenerationEU/PRTR.

Bibliografía

Abrisqueta, I., Conejero, W., López-Martínez, L., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M. C. (2017). Root and aerial growth in early-maturing peach trees under two crop load treatments. Spanish Journal of Agricultural Research. 15: e0803.

Allen, R.G., Pereira, J.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements No 56 FAO Rome (Italy). 300pp.

Ayars, J.E., Fulton, A., Taylor, B. (2015). Subsurface drip irrigation in California – Here to stay?. Agricultural Water Management. 157: 39–47.

Blanco, V., Kalcsits, L. (2021). Microtensiometers accurately measure stem water potential. Plants 10: 2780.

Camp, C.R., Lamm, F.R., Evans, R.G., Phene, C.J. (2000). Subsurface drip irrigation: Past, present, and future. En: Proc. 4th Decennial Nat'l Irrigation Symp., 363- 372. R.G. Evans, B.L. Benham, T.P. Trooieneds. St. Joseph, Mich.: American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Chen Y, Huang Y, Sun W. (2017). Using Organic Matter and pH to Estimate the Bulk Density of Afforested/Reforested Soils in Northwest and Northeast China. Pedosphere. 27(5): 890–900.

Colaizzi, P.D., Schneider, A.D., Evett, S.R., Howell, T.A. (2004). Comparison of SDI, LEPA, and spray irrigation performance for grain sorghum. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 47(5): 1477–1492.

Conesa, M.R., Conejero, W., Vera, J., Agulló, V., García-Viguera, C., Ruiz-Sánchez, M.C. (2021). Irrigation management practices in nectarine fruit quality at harvest and after cold storage. Agricultural Water Management. 243: 106519.

Conesa, M.R., Conejero, W., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C. (2023). Assessment of trunk microtensiometer as a novel biosensor to continuously monitor plant water status in nectarine trees. Frontiers and Plant Science. 14: 1123045.

Doorenbos, J., Pruitt, W.O. (1988). Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riegos y Drenajes. 24. Ed. FAO. Roma. 194 pp.

Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos (ESRC). Análisis de los regadíos de España. (2022). Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 50 pp

Fereres E., Pruitt W.O., Beutel J.A., Henderson D.W., Holzapfel E., Schulbach H., Uriu K. (1981). Evapotranspiration and drip irrigation scheduling, pp 8-13. En: Drip Irrigation Management. E. Fereres. (Ed.). Univ. California, Davis, Ca, (USA). 39 pp.

Fernández Gómez *et al*. (2010). Manual de riego para agricultores: módulo 4. Riego localizado: manual y ejercicios. Sevilla. Junta de Andalucía. Conserjería de Agricultura y Pesca, 154 pp.

Gispert Folch, J.R. (2008). Investigación para caracterizar el volumen de suelo húmedo (VSH) en riego localizado. Influencia del VSH en olivo (Olea europea L.) Manzano (Malus domestica BOKH.) y avellano (Corylus avellana L.). Tesis Doctoral. Universitat de Lleida. 345 pp.

Groenendyk, D.G., Ferré, T.P., Thorp, K.R., Rice, A.K. (2015). Hydrologic-Process-Based Soil Texture Classifications for improved visualization of landscape function. PLoS ONE. 10(6): e0131299.

Gucci, R., Lombardini, L., Tattini, M. (1997). Analysis of leaf water relations in leaves of two olive (Olea europaea) cultivars differing in tolerance to salinity, Tree Physiology. 17 (1): 13–21.

Hernández Abreu, J.M., Rodrigo López, J., Pérez Regalado, A., González Hernández, J.F. (1983). III Curso Internacional de Riego Localizado. Tenerife. Islas Canarias, España. 317pp

Heuscher S.A., Brandt C.C., Jardine P.M. (2005). Using soil physical and chemical properties to estimate bulk density. Soil Science Society of America Journal. 69: 51–56.

Hsiao, T.C. (1990). Measurement of plant water status. En: Irrigation of Agricultural Crops (Monograph No 30). Eds. B.A. Stewart and D.R. Nielsen. American Society of Agronomy. Madison, 243-279 pp.

Ivelic S., Jorge, Reckmann A., Oscar, Agnieszka D., Dorota, López-Olivari, Rafael, Uribe C., Hamil, Valenzuela M., Jaime y Ibarra G., Diego (2022) Bases para el riego de praderas en Magallanes. Punta Arenas, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Boletín INIA - Instituto de Investigaciones Agropecuarias. N 459. Disponible en: https://hdl.handle.net/20.500.14001/68621 (Consultado: 12 abril 2024).

Jones, H.G. (1990.) Plant water relations and implications for irrigation scheduling. Acta Horticulturae. 278: 67–76.

Jornada de riego localizado subterráneo (RLS). Servicio de Formación y Transferencia Tecnológica de la Conserjería de Agua, Agricultura, Ganadería y Pesca de la Región de Murcia. https://www.sftt.info/. CIFEA de Lorca (Murcia), 1 de octubre de 2019.

Karmeli, D., Peri, G., Todes, M. (1985). Irrigation systems: Design and operation. Oxford University Press. 187 pp.

Keller, J. (1978). Trickle Irrigation. En: Soil Conservation Service National Engineering Handbook. Colorado (USA). 129 pp.

Lamm, F.R., Bordovsky, J.P., Schwankl, L.J., Grabow, G.L., Peters, R.T., Colaizzi, P.D., Trooien, T.P., Porter, D.O. (2012). Subsurface drip irrigation: Status of the technology in 2010. American Society of Agricultural and Biological Engineers. 55, 483–491.

Lamm, F.R., Rogers D.H. (2012). Hydraulic consideration for SDI systems. In: Proc. 2012 Irrigation Association Tech. Conf., Orlando, Florida, November 4-5, 2012. Disponible desde el IA, Falls Church, VA. CD-Rom, 9 pp.

Legaz, F., Bacab Chi, U., Quiñones, A., Martínez-Alcántara, B., Galán-Ávila, A., Polo Folgado, C. (2010). Respuesta agronómica de la reducción del aporte hídrico en los cítricos en función de la pluviometría y el riego deficitario controlado en riego por goteo superficial y subterráneo. Levante Agrícola. 49: 109–117.

Martínez, J., Reca, J. (2014). Water use efficiency of surface drip irrigation versus an alternative sub-surfaced drip irrigation method. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 745: 733–743.

Martínez-Gimeno, M.A., Bonet, L., Provenzano, G., Badal, E., Intrigliolo, D.S., Ballester, C. (2018). Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation. Agricultural Water Management. 206: 209–216

Merriam, J.L. (1966). A management control concept for determining the economical depth and frequency of irrigation, Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE) No 9: 492–498.

Monge, M.A. (2018). Diseño agronómico e hidráulico de riegos agrícolas a presión. Ed. Agrícola Española, S.A. 633 pp.

Montaña, C., Carot, M., Quiñones, A., Mártinez-Alcantara, B., Primo-Millo, E., Légaz, F. (2005). Riego deficitario en goteo superficial y subterráneo. Vida Rural, 210: 40–44.

Montoya, F., Sánchez, J.M., González-Piqueras, J., López-Urrea, R. (2022) Is the subsurface drip the most sustainable irrigation system for almond orchards in water-scarce areas? Agronomy. 12: 1778.

Moya Talens, J.A. Manual básico de cultivo localizado. Riego y Fertirrigación. (2017). Ed. Mundi-Prensa, España, 638 pp.

Nobel, P. (1983). Biophysical Plant Physiology and Ecology. Eds. W.H. Freeman y Company (New York, USA), 608pp.

Pizarro, F. (1987). Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación. Ed. Mundi-Prensa. 514 pp.

Primo-Millo, E., Legaz, F., Quiñones, A., Gornat, B., Bañuls, J., Montaña, C., Martín, B. (2002). El sistema de riego por goteo subterráneo Vip Underground como mejora de la eficiencia del uso del agua en los cítricos. Congreso Nacional de Riegos y Drenajes XXI, 127: 50–55

Quiñones, A., Polo-Folgado, C., Chi-Bacab.; Martínez-Alcántara, B., Legaz, F. (2012). Water productivity and quality in deficit irrigated orchard. En: Irrigation System and Practices in Challenging Environments. Ed. Teang Shui Lee, InTech Open (London, UK). 33–56 pp.

Rincón Sánchez, L.F. (2008). La fertirrigación de la lechuga. Eds. Mundi-Prensa. 260 pp.

Robles J.M., Botía, P., Pérez-Pérez, J.G. (2016). Subsurface drip irrigation affects trunk diameter fluctuations in lemon trees. Agricultural Water Management. 165: 11–21.

Robles, J.M., García-García, J., Navarro, J.M., Botía, P., Pérez-Pérez, J.G. (2023). Changes in drip irrigation water distribution patterns improve fruit quality and economic water productivity in early-season lemon trees. Agronomy. 13: 1519.

Rodrigo, J., Hernández, J.M., Pérez, A., González, J.F. (1992). Riego localizado. Eds. Mundi-Prensa, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. 405 pp.

Rodriguez-Sinobas, L., Gil, M. (2012). A review of subsurface drip irrigation and its management. En: Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crop. Ed. Shui Lee, T. Intech Open Limited- (London, UK) 171–194 pp.

Romero, P., Botía, P., García, F., (2004a). Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees. Plant Soil 260, 155-168.

Romero, P., Botía, P., García, F. (2004b). Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. Plant Soil 260: 169–181.

Romero, P., García, J., Botía, P. (2006b). Cost–benefit analysis of a regulated deficit irrigated almond orchard under subsurface drip irrigation conditions in south-eastern Spain. Irrigation Science. 24: 175–184.

Schifris, S., Schweitzer, A., Matan, E., Borkow, G. (2015). Inhibition of root penetration in subsurface driplines by impregnating the drippers with copper oxide particles. Irrigation Science. 33: 319–324.

Scholander, P.F., Bradstreet, E.D., Hemmingsen, E.A., Hammel, H.T. (1965). Sap Pressure in Vascular Plants: Negative hydrostatic pressure can be measured in plants. Science. 148 (3668): 339–46

Shackel, K. A., Ahmadi, H., Biasi, W., Buchner, R., Goldhamer, D., Gurusinghe, S., *et al*. (1997). Plant water status as an index of irrigation need in deciduous fruit trees. HortTechnology. 7 (1): 23–29.

Stewart, R. D. (2018). A dynamic multidomain Green-Ampt infiltration model. Water Resources Research, 54: 6844–6859.

Richards, L. A., W.R. Gardner, Ogata, G. (1956). Physical processes determining water loss from soil. Soil Science Society American Journal, No 3. 20: 310–314.

Tyree, M.T., Richter. H. (1981). Alternate methods of analyzing water potential isotherms: some cautions and clarifications. I. The impact of non-ideality and of some experimental errors. Journal of Experimental Botany. 32: 643-653.

USDA (United States Department of Agriculture) Soil Survey Manual. (1951). Handbook No. 18, Soil Survey Staff, Bureau of Plant Industry, Soils and Agricultural Engineering, United States Department of Agriculture, Washington DC, No 205. 638 pp.

Van den Honert, T.H. (1948). Water transport in plants as a catenary process. Discussions of the Faraday Society. 3: 146-153.

Vera, J., Conejero, W., Mira-García, A. B., Conesa, M. R., Ruiz-Sánchez, M. C. (2021). Towards irrigation automation based on dielectric soil sensors. Journal of Horticultural Science and Biotechnology. 96 (6): 696–707.

Wang, H., Wang, N., Quan, H., Zhang, F., Fan, J., Feng, H., Cheng, M., Liao, Z., Wang, X., Xiang, Y. (2022). Yield and water productivity of crops, vegetables and fruits under subsurface drip irrigation: A global meta-analysis. Agricultural Water Management. 269. 107645.

La tranquilidad genera eficiencia, el conocimiento nos hace más eficaces y la seguridad nos hace más productivos.

El control total sobre los procesos, para preservar la calidad de tus frutos, es un sueño futuro que **ahora** Citrosol lo ha hecho presente.

Descubre nuestra innovación en **consumo inteligente**. Revolución en el control de podrido postcosecha, control de tratamiento en tiempo real, análisis constantes de los caldos de tratamiento, ahorro económico por disminución de mermas y reclamaciones.

Descubre más.

Uso de hidrogeles en agricultura

GREEN LEGACY desarrolla hidrogeles, una tecnología innovadora y altamente eficaz en el ámbito de la agricultura, ofreciendo soluciones sostenibles para enfrentar desafíos relacionados con el manejo del agua, la productividad agrícola y la gestión del suelo

1. Introducción

La agricultura moderna enfrenta desafíos cada vez más complejos debido al cambio climático, la creciente demanda de alimentos y la escasez de recursos naturales, siendo el agua uno de los más críticos. En muchas regiones del mundo, la disponibilidad de agua es limitada, y las sequías prolongadas amenazan la producción agrícola. Para abordar estos retos, se han desarrollado diversas tecnologías que buscan optimizar el uso de agua en los cultivos, y los hidrogeles emergen como una solución prometedora para mejorar la eficiencia hídrica en la agricultura.

¿Qué son los hidrogeles?

Los hidrogeles son polímeros superabsorbentes con una notable capacidad para absorber y retener grandes cantidades de agua i elementos nutritivos disueltos en la misma, liberándola gradualmente según las necesidades de las plantas. Estas características los convierten en una herramienta clave para mitigar los efectos del estrés hídrico y asegurar un suministro de agua i nutrientes constante a los cultivos particularmente en condiciones de restricción hídrica. Esta tecnología, permite aprovechar plenamente el potencial productivo de los cultivos, lo que ha hecho que su popularidad crezca en los últimos años, especialmente en áreas áridas y semiáridas.

Su capacidad de captar y almacenar agua, así como elementos nutritivos, que normalmente serían perdidos por percolación profunda y lixiviación, permite ahorrar agua reduciendo la frecuencia del riego, manteniendo no obstante el potencial productivo.

Evolución de los hidrogeles

Desde finales del siglo XX, cuando se empezaron a desarrollar polímeros sintéticos para su uso en suelos agrícolas, la tecnología de los hidrogeles ha avanzado significativamente. Los hidrogeles modernos son más eficientes y respetuosos con el medio ambiente, ya que pueden estar formulados con componentes biodegradables.

Funcionamiento sencillo pero efectivo

Cuando se mezclan con el suelo, estos polímeros absorben agua durante el riego o las lluvias y la almacenan en su estructura.

A medida que el suelo se seca, los hidrogeles liberan el agua retenida, manteniendo la humedad en la zona radicular de las plantas necesaria para el crecimiento de estas y el mantenimiento de la actividad biológica del suelo. De esta manera, los cultivos pueden acceder a una reserva adicional de agua y elementos nutritivos especialmente en condiciones de sequía o de riego restringido.

La capacidad de los hidrogeles de captar y almacenar agua, así como elementos nutritivos, que normalmente serían perdidos por percolación profunda y lixiviación, permite ahorrar hasta el 50 % de agua reduciendo así la frecuencia del riego, manteniendo, como decíamos en apartados anteriores, el potencial productivo. El proceso continuo de hinchamiento inicial del polímero y de la liberación progresiva del agua a las plantas (deshinchamiento) permite además mejorar la estructura del suelo aumentando su porosidad. Así los hidrogeles pueden contribuir a una distribución más uniforme del agua, evitando la acumulación en ciertas áreas del suelo y reduciendo el riesgo de erosión o lixiviación de nutrientes.

Estas características principales, que permiten aumentar el rendimiento y la calidad de los cultivos han hecho que su popularidad crezca en los últimos años, especialmente en áreas áridas y semiáridas.

En el contexto de la sostenibilidad hídrica, los hidrogeles representan una de las herramientas más efectivas para reducir el consumo de agua en la agricultura sin comprometer la productividad de los cultivos. Su uso ayuda a conservar recursos hídricos, especialmente en zonas con escasez de agua, donde cada gota cuenta. Al disminuir la cantidad de agua necesaria para el riego, también se reduce el coste energético asociado a sistemas de riego y bombeo, lo que convierte a los hidrogeles en una solución rentable tanto desde el punto de vista económico como medioambiental.

En resumen, el uso de hidrogeles en la agricultura responde a la necesidad urgente de encontrar nuevas soluciones para hacer frente a los problemas de disponibilidad y gestión del agua en la producción de alimentos. A medida que la tecnología sigue avanzando, estos polímeros tienen el potencial de desempeñar un papel cada vez más importante en la transición hacia una agricultura más eficiente y sostenible, siendo un componente esencial en la búsqueda de métodos que permitan optimizar el uso del agua y mejorar la resiliencia de los cultivos frente al cambio climático.

2. Composición y características de nuestros hidrogeles.

Es por estas razones que en Green Legacy nos abocamos a desarrollar nuestra propia línea de hidrogeles agrícolas de alto rendimiento de última generación. Actualmente, producimos dos tipos de hidrogeles superabsorbentes: **POLYSORB**, compuesto por poliacrilato de potasio reticulado, y **POLYGRAIN**, un compuesto basado principalmente de polímeros naturales además de polímeros convencionales y un fertilizante “starter” compuesto de NPK + Mg.

Ambos hidrogeles son completamente biodegradables, no tóxicos, y debidamente autorizados para su aplicación en la producción agrícola en Austria, la Unión Europea y otros países. El hecho de que nuestros productos incluyen únicamente ácido acrílico y sal de potasio (POLYSORB), así como de polisacáridos (POLYGRAIN) los diferencia considerablemente de otros hidrogeles en el mercado, que suelen estar compuestos total o parcialmente a base de sal de sodio o de acrilamida. Al descomponerse, los hidrogeles a base de sodio liberan este elemento en el suelo, generando efectos negativos tanto para los suelos como para las plantas. Además, las acrilamidas están clasificadas como sustancias carcinogénicas y mutagénicas.

Los tres factores más importantes para evaluar el potencial agronómico de los hidrogeles son su capacidad de absorber y retener agua y nutrientes, su eficiencia en liberarlos y su tiempo de degradación en el suelo.

Nuestros hidrogeles pueden absorber y retener entre 200 y 400 veces su propio peso en agua, así como los nutrientes disueltos en ella.

La alta capacidad de absorción y retención hídrica y de nutrientes se debe principalmente a la presión osmótica creada por el gradiente de concentración entre el interior y el exterior del polímero, junto con las fuerzas electrostáticas de repulsión y atracción en su interior. Esta reserva de agua y nutrientes permite a las plantas mantener un crecimiento y desarrollo sin alteraciones, incluso durante períodos prolongados de sequía.

Gracias al alto rendimiento de nuestros hidrogeles, hemos demostrado, a través de estudios realizados con agricultores y centros de investigación en distintos países, que el uso de nuestros productos puede ahorrar hasta un 50% del agua de riego y hasta un 20% de los fertilizantes, manteniendo la misma producción total. Esto reduce significativamente los costes para el agricultor.

El tiempo de vida de nuestros productos en el suelo es muy notable. Siempre que el producto sea aplicado de la forma correcta podemos contar con que el hidrogel permanecerá activo en nuestro suelo de 3 a 5 años. Este periodo varía en función de la actividad microbiológica del suelo, que es la responsable de degradar de forma lenta el hidrogel.

3. Campos de aplicación en la agricultura

Los hidrogeles están mostrando cada vez más su gran capacidad para ser aplicados en un amplio abanico de ámbitos en el sector agrícola. Desde el sector viverístico al cultivo de frutales pasando por la viña, la oliva y otros cultivos especializados sin olvidar el cereal en extensivo. Las ventajas de usar hidrogeles son numerosas.

Esto se debe a que los hidrogeles no solo aumentan la eficiencia en el uso de agua y fertilizantes, sino que presentan a su vez capacidades muy notables para mejorar los suelos y sustratos destinados a fines agrícolas puesto que influyen en aspectos tan relevantes de un suelo como su densidad, porosidad, capacidad de infiltración Y mineralización de la materia orgánica, entre otros.

Como ya hemos afirmado, el uso de hidrogeles es versátil. Podemos aplicarlos en nuevas plantaciones de árboles frutales, viña y proyectos de reforestación, donde el hidrogel y su capacidad de retención de agua y mejora de las condiciones edafológicas reducirá significativamente la mortalidad de los plantones, suministrando agua a la planta de forma constante y facilitando el crecimiento radicular de estas plantas juveniles, ambas cuestiones de vital importancia en el establecimiento de una nueva plantación.

Esto se podrá hacer de forma mecánica y manual, tanto con el hidrogel en forma de gránulos secos como en forma de gránulos ya pre-hidratados.

Se puede usar hidrogel también en plantaciones ya establecidas, tanto en proyectos paisajísticos, como en olivares ya existentes, además de todos los cultivares previamente citados. También aquí se puede aplicar el hidrogel tanto en forma de gránulo como en forma de hidrogel ya hidratado.

El hidrogel en forma de gránulos puede ser aportado al suelo de diversas maneras, que dependerán, principalmente, del tipo de cultivo y su estado de desarrollo (nueva plantación vs. plantación establecida).

Aquí encontraremos métodos diversos como la inyección del producto en el suelo a través de una lanza inyectora, con ayuda de un subsolador y una microgranuladora acoplada al mismo, o incluso introduciendo el granulado en la tolva para el cereal de nuestra sembradora. También son posibles métodos de aplicación manual, donde se añada el hidrogel en forma de gránulos secos o en forma de gránulos pre-hidratados en el hoyo de plantación, mezclando el producto con el suelo o el sustrato de relleno.

4. Métodos de aplicación

Aplicación Manual

Como explicábamos en el punto anterior, los métodos de aplicación de POLYGRAIN y POLYSORB son muy variados, pero suponen un paso clave en el éxito de su uso. Empecemos pues con sus aplicaciones manuales.

Aquí nos encontramos con el método de aplicación más sencillo de llevar a cabo. Cuando se deba aplicar el hidrogel, por ejemplo, en un proyecto de reforestación donde los plantones se llevan al monte para ser plantados manualmente, o estemos haciendo una nueva plantación de olivos, deberemos añadir las cantidades recomendadas de hidrogel o granulado en el hoyo de plantación y, a ser posible, mezclar el mismo con la tierra o turba extraída para hacer el hoyo, repartiendo de forma uniforme el producto, con el fin de estimular un crecimiento radicular homogéneo. Hecho esto, será importante crear una capa de unos 5 cm de grosor sin producto que cubra esta mezcla de suelo y producto con el fin de proteger al mismo de la radiación solar. Este paso es importante, ya que si el hidrogel queda expuesto a dicha radiación su vida útil y sus prestaciones se ven gravemente afectadas.

Otro método de aplicación manual con grandes resultados consiste en añadir la dosis adecuada de hidrogel mientras se plantan vides de forma mecánica. El proceso consiste en que un operario en el asiento de la plantadora deposita la vid en

el suelo con ayuda de la plantadora mientras el otro operario echa a su vez la cantidad recomendada de hidrogel o granulado en el surco hecho por la plantadora.

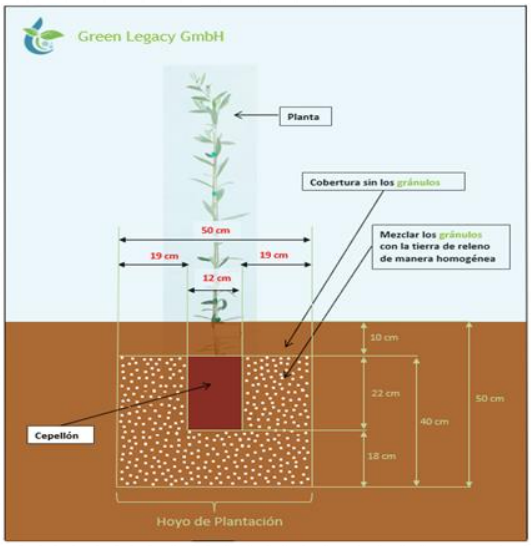


Figura 1. Esquema de plantación manual de un plantón de olivo.

Este proceso es fácilmente automatizable añadiendo un microgranulador a la plantadora, evitando así tener que usar un operario para añadir el producto. De este modo, se aplicará la cantidad necesaria de hidrogel o granulado a la vez que se plantan las nuevas vides reduciendo así significativamente la mortalidad de los nuevos plantones.

Aplicación mecánica

En cuanto a la aplicación mecánica de los productos de Green Legacy encontramos un amplio abanico de posibilidades, que facilitan enormemente el uso de los hidrogeles superabsorbentes a mayor escala.

- Aplicación con subsolador:

Este método consiste en conectar un microgranulador a nuestra subsoladora, de tal forma que cuando realicemos las tareas de descompactación se aplique directamente el hidrogel en los pasillos del cultivo. Este proceso debe llevarse a cabo conectando los tubos del microgranulador a la parte posterior de las púas del subsolador. De este modo el hidrogel se deposita directamente a cierta profundidad, mejorando no solo las propiedades fisicoquímicas de nuestro suelo, sino que además estimularemos de este modo un crecimiento radicular en profundidad. Este método es ideal para tratar grandes superficies de árboles frutales o de viña.

Figura 2. Microgranulador LEHNER montado sobre una plantadora de patata (Fuente: https://www.lehner.eu/agrodos/).

- Aplicación con lanza de inyección:

Este método ha sido desarrollado en tándem con la empresa alemana VOGT GmbH. Este sistema está pensado para ser utilizado en los lugares donde la aplicación del producto con una sembradora o con el subsolador no sean posibles o estén contraindicados. El sistema de aplicación consiste en usar esta lanza de inyección para crear oquedades en el suelo que posteriormente son rellenadas de hidrogel por la misma lanza inyectora. El primero paso de este proceso consiste en clavar esta lanza en el suelo, que en primera instancia bombea aire a alta presión en el suelo para, como decíamos previamente, crear unas oquedades en el suelo. Este paso descompacta y aérea el suelo. En un segundo paso, la lanza, conectada a un depósito con hidrogel ya pre-hidratado, bombea el producto en las oquedades creadas en el primero paso, repartiéndolo de forma uniforme. Este paso debe realizarse varias veces en diferentes puntos alrededor del árbol para que quede bien distribuido en todo el suelo.

- Aplicación con sembradora:

Este método también resulta de lo más práctico, especialmente para el cultivo cerealístico, el cultivo del maíz, tanto para ensilaje y grano, para el cultivo de nabo azucarero, patata, etc. El método cosiste en introducir las dosis recomendadas de hidrogel (variable según el cultivo) en la misma tolva de la sembradora, para que sea depositado en el suelo junto a las semillas del cultivo que llevaremos a cabo (Figura 2).

5. Estudio de campo realizado en España

Como hemos afirmado con anterioridad, en Green Legacy hemos llevado a cabo estudios con hidrogeles en varios campos de la agricultura, fruticultura, viticultura y silvicultura que validan los efectos positivos sobre el rendimiento de los cultivos y su rentabilidad económica.

Aquí un ejemplo de un estudio realizado con nuestros hidrogeles en una plantación de tomate en Sevilla por la empresa líder global en validación SGS:

Ensayo de tomatera en campo abierto en Murcia (España)

- Sociedad de investigación: Instituto Fresenius, SGS Española de Control (Sevilla)
- Centro experimental: Ctr. Benacazón-Bollullos (SE-3306), Km 1, Benacazón, España
- Sistema de cultivo: Cultivo bajo riego
- Variedad: H1015 (variedad de procesamiento), 80 - 90 días, sensible a la sequía
- Tipo de suelo: franco arenoso con 14,4 % arcilla
- Fecha de plantación: 27 Julio 2023
- Tratamientos: Tratamiento 1: Dosis de aplicación de POLYSORB y POLYGRAIN 0 g (control), 1,5 g, 1,8 g y 2,1 g /planta
- Tratamiento 2: Riego al 100 % (control) y al 45 % (reducción de las cantidades de riego mediante la reducción de las cantidades por riego y la prolongación de los intervalos de riego)
- Parámetros de evaluación: parámetros de crecimiento, de rendimiento y económicos

Resultados experimentales (P < 0,05):

Un ensayo de campo realizado por el renombrado Instituto Fresenius de SGS en España en 2023 demostró la eficacia de POLYSORB y POLYGRAIN. El ensayo de campo con tomates demostró que la aplicación de 1,5 g a 2 g de producto por planta puede ahorrar hasta un 50% del agua utilizada manteniendo el mismo volumen y calidad de producción. A pesar de que los meses de agosto a noviembre de 2023 fueron más calurosos que la media de esos meses en años distintos, no se observaron disminuciones en cuanto a la calidad y cantidad de la cosecha tras usar POLYGRAIN o POLYSORB.

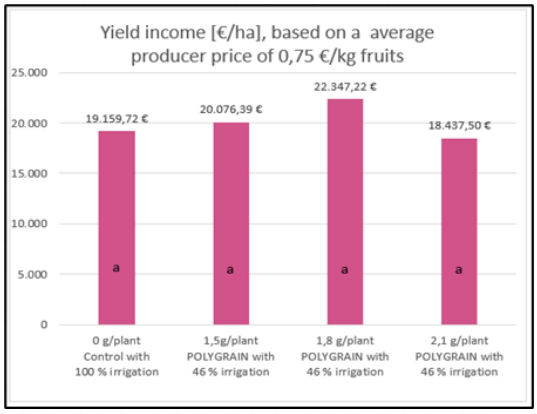


Figura 3. Efectos de POLYGRAIN sobre el rendimiento económico ($/ha) de la cosecha de tomate

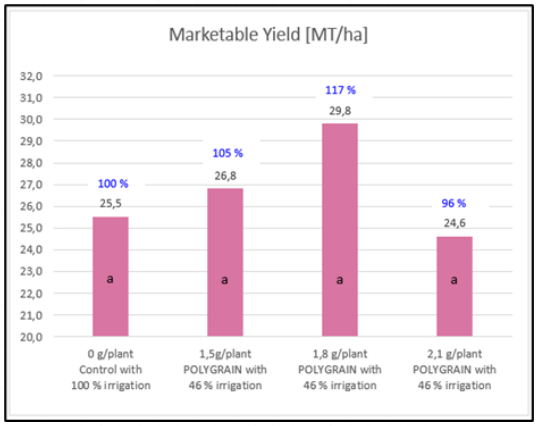


Figura 4. Efectos de POLYGRAIN sobre la cosecha comercializable de tomate (MT/ha)

6. Conclusión

En conclusión, los hidrogeles se consolidan como una tecnología innovadora y altamente eficaz en el ámbito de la agricultura, ofreciendo soluciones sostenibles para enfrentar desafíos relacionados con el manejo del agua, la productividad agrícola y la gestión del suelo. Su capacidad para retener grandes cantidades de agua y liberarla de manera controlada proporcionan una herramienta eficiente para mejorar la disponibilidad de agua en los cultivos, especialmente en zonas con escasez hídrica o en condiciones de sequía. Esta capacidad de almacenamiento y liberación gradual de agua no solo optimiza el uso del recurso hídrico, sino que también promueve un crecimiento más uniforme y saludable de las plantas.La versatilidad de los hidrogeles, tanto en su composición como en su aplicación, ha permitido su integración en distintas prácticas agrícolas, desde el tratamiento del suelo hasta la captación de nutrientes y agroquímicos, lo que reduce la necesidad de riego y fertilización frecuente y minimiza la pérdida de fertilizantes por lixiviación. Además, los estudios realizados en este campo confirman que su uso puede mejorar significativamente la eficiencia de los recursos y promover prácticas agrícolas más sostenibles, reduciendo el impacto medioambiental y potenciando la productividad en condiciones adversas.

En resumen, los hidrogeles tienen un gran potencial para transformar las técnicas de manejo agrícola. Sus aplicaciones van más allá de la gestión del agua, contribuyendo a una agricultura más resiliente y productiva. En Green Legacy, desempeñamos un papel clave en el establecimiento y desarrollo continuo de esta tecnología, impulsando la adopción de buenas prácticas agrícolas. Con nuestro enfoque constante en la investigación y la optimización de las propiedades de los hidrogeles, seguiremos liderando la innovación agrícola y promoviendo la sostenibilidad a largo plazo

Contacto

GREEN LEGACY GMBH
Stadlauer Str. 60/1/3
A-1220 WIEN – AUSTRIA
Tel.: (+34) 327 711 708
ferran.cabiol@greenlegacy.at
www.greenlegacy.at

2.2. Determinación de las necesidades hídricas

Juan Miguel Ramírez Cuesta[1,3], Luis Bonet Pérez de León*[2], Ignacio Buesa Pueyo[3]

[1] *Dipartimento di Agricoltura, Alimentazione e Ambiente (Di3A), Università degli Studi di Catania*
[2.] *Servicio de Tecnología del Riego. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)*
[3] *Grupo de ecología y cambio global. Centro de Investigaciones sobre Desertificación (CIDE; CSIC-UV-GVA)*

* bonet_lui@gva.es

Índice

1. Introducción 88
2. Atmósfera: Metodología del Balance de Agua (*FAO56*) 89
   2.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0) 89
   2.2. El coeficiente de cultivo (K_c) 91
   2.3. Nuevas tendencias en el ámbito de la estimación de la ETc 93
3. Suelo. Sensores de Humedad 97
   3.1. Tipos de sensores de humedad del suelo 97
   3.2. Sensores de instalación fija o portátil 100
   3.3. Diseño de una red de sensorización de humedad del suelo 101
   3.4. Instalación de sensores de humedad 102
   3.5. Interpretación de las curvas de humedad del suelo 104
   3.6. Umbrales de gestión de la humedad del suelo 104
   3.7. Tendencias de futuro en sensorización de humedad del suelo 105
4. Planta. Monitorización del estado hídrico de un cultivo 106
   4.1. Tipos de sensores de planta 106
   4.2. Consideraciones generales al uso de sensores de estado hídrico de los cultivos 112
   4.3. Nuevas tendencias en sensorización de la planta 112

Resumen

La agricultura es la mayor consumidora de agua dulce del planeta. Por ello, un adecuado uso del recurso es fundamental para garantizar las necesidades alimentarias en equilibrio con las crecientes demandas para otros usos. Además, el cambio climático unido al aumento de la población mundial plantea un escenario de cada vez mayor presión sobre el recurso determinando que las previsiones auguren un agravamiento del estrés hídrico en la cuenca mediterránea en hasta un 200 % para el 2030.

En este contexto tan complejo, el desarrollo actual de las técnicas de riego, con el impulso dado por la digitalización, ofrece toda una serie de procedimientos tecnológicos para optimizar el uso del agua, mejorar la eficiencia de la aplicación y proporcionar ganancias de productividad, sin comprometer ni la disponibilidad ni la calidad del agua.

Ello tiene su obligado punto de partida en una adecuada estimación de las cantidades de agua que requieren los cultivos y, para ello, existen diversas herramientas que permiten un ajuste bastante preciso de las dosis de riego y su correcta aplicación en parcela, elementos fundamentales para alcanzar mayores cotas de eficiencia en el uso del agua. Estas herramientas comúnmente recurren al análisis del continuo suelo-planta-atmosfera (SPA) como fuente de información de base para el establecimiento de una programación de riego eficiente.

1. Introducción

Es casi un lugar común el atribuir a la agricultura de regadío la responsabilidad de ser la mayor consumidora del agua dulce del planeta. Algo menos lo es el hecho de que las producciones de regadío representan el 40% del total ocupando únicamente el 16% de la superficie agrícola mundial y que, por tanto, son el sustento de un importante tejido socioeconómico. Además, la agricultura de regadío muchas veces está ubicada en zonas con escasas alternativas de progreso y con sensibles problemas estructurales.

La capacidad vertebradora del regadío ha sido una de las herramientas más frecuentemente utilizadas para la mejora económica de grandes áreas y territorios, sirviendo de justificación para la puesta en marcha de inversiones fundamentalmente orientadas a la búsqueda de la eficiencia del riego a través de la mejora de infraestructuras. El caso español es un ejemplo de ello, desde las grandes transformaciones de la postguerra gracias a la Ley de Zonas Regables de 1949, pasando por el auge de la presurización de los riegos en los años 70 con la “revolución verde” hasta las todavía vigentes e intensas medidas de apoyo público a la modernización de infraestructuras de regadío. El resultado de todo ello dibuja un regadío español como uno de los potencialmente más eficientes (Garrido y Perez-Pastor, 2019).

La eficiencia de un regadío altamente tecnificado, en términos de óptimo aprovechamiento del recurso, puede verse seriamente mermada si la aplicación final de las cantidades de agua a los cultivos no se realiza correctamente, induciendo bien a sobreconsumos, pérdidas en profundidad, además de perjuicios productivos y medioambientales. Para evitar estos efectos indeseables, una vez modernizadas las infraestructuras, debemos promover la modernización de los hábitos de riego. Ello implica dotar al usuario del agua de riego de información, formación y herramientas que le permitan conocer la cantidad de agua que debe aportar al cultivo en cada momento fenológico y el mejor modo de aplicarla en parcela.

Hoy en día existen a disposición de los usuarios del agua de riego distintas metodologías para el cálculo de necesidades hídricas. Estas metodologías difieren en su precisión, accesibilidad y eficacia, pero todas ellas tienen como base la información obtenida de cada uno de los elementos que conforman el circuito que capacita, regula y condiciona la absorción de agua por parte de las plantas: el continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC).

Disponer de información implica captarla y para ello se requiere la utilización de instrumentos de medida. En la actualidad, es posible una medición exhaustiva, precisa y continua de los distintos parámetros del SPAC gracias al gran desarrollo de la tecnología de sensores. Además, si a ello añadimos los actuales sistemas de transmisión casi inmediata de la información y la capacidad de efectuar un procesado de los datos minucioso y cada vez más complejo, tendremos como resultado lo que se conoce como "la digitalización del riego", la actual revolución en la que se enmarca el regadío agrícola.

En definitiva, este capítulo pretende ofrecer a los usuarios del agua de riego una recopilación de las distintas metodologías disponibles para la determinación de necesidades hídricas de los cultivos que, sin ser exhaustiva, contemple una gama suficientemente amplia de herramientas que cubra las distintas necesidades, siempre desde perspectiva eminentemente práctica.

2. Atmósfera: Metodología del Balance de Agua (*FAO56*)

Dentro de las distintas metodologías disponibles para la estimación de las necesidades de agua de los cultivos, es poco probable encontrar hoy en día una tan extendida y utilizada como la conocida como *FAO56*, gracias a que es la Organización Internacional para la Agricultura y la Alimentación (*FAO*, por sus siglas en inglés) su principal valedora a través del documento de la Serie de Riego y Drenaje de la FAO, No. 56. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos

Este método propone la aproximación a la evapotranspiración del cultivo (ET_c) a través del producto de dos parámetros. El primero de ellos pretende reflejar el potencial extractivo de unas condiciones meteorológicas dadas sobre una superficie de referencia; un cultivo herbáceo de 12 cm de altura en cobertura completa y sin limitaciones hídricas. El parámetro así obtenido recibe el nombre de evapotranspiración del cultivo de referencia o, más comúnmente, evapotranspiración de referencia (ET_0) y se expresa en unidades de altura de agua (mm). El segundo factor, adimensional, pondera y ajusta el valor de ET_0 a las condiciones concretas del cultivo, denominado por ello coeficiente de cultivo (K_c). En definitiva, el método *FAO56*, estima el consumo de agua de un cultivo como una fracción de la evapotranspiración de referencia según la sencilla fórmula:

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c$$

2.1. Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0)

Para el cálculo de la ET_0, la *FAO* propone un procedimiento estandarizado con origen en los trabajos de Penman y Monteith que dieron lugar a un modelo que combina el balance energético con el método de la transferencia de masa. Es la fórmula empírica conocida como FAO Penman-Monteith. En dicha fórmula participan tanto datos climáticos (temperatura y humedad relativa del aire, velocidad de viento y radiación) como parámetros físicos asociados a las superficies evapotranspirativas (albedo, resistencia superficial, etc.).

FAO Penman-Monteith no es, en absoluto, el único recurso existente para estimar la exigencia atmosférica en un periodo dado. Hay alternativas más accesibles en tanto en cuanto requieren menos parámetros de entrada y (Tabla 1) cuyos procedimientos de cálculo son más sencillos.

Existen metodologías basadas en temperatura del aire y radiación como Hargreaves-Samani o FAO Radiación o, incluso más sencillas, que requieren únicamente de datos de temperatura del aire, como Blaney-Criddle, sin considerar métodos como el tanque evaporimétrico de Clase A, previos al desarrollo y extensión de las tecnologías de monitorización ambiental. Sin embargo, estas metodologías alternativas a FAO Penman-Monteith se caracterizan por necesitar de calibraciones frecuentes, verse afectadas por condiciones locales o ser imprecisas en condiciones áridas o semi-áridas. En definitiva, la solidez de la ecuación FAO Penman -Monteith, gracias en parte a que en su cálculo intervienen un mayor número variables, determina que pueda aplicarse bajo las más diversas condiciones.

Tabla 1. Valor de la ET_0 (mm) según distintas metodologías para el 18 de marzo de 2024 en tres estaciones de la red SIAR ubicadas en zonas citrícolas

Provincia	Estación	Blaney Criddle	FAO Radiación	FAO Penman Monteith	Hargreaves-Samani
Alicante	Ondara	2.02	2.39	2.15	3.18
Murcia	Alhama de Murcia	4.32	3.86	3.94	4.72
Sevilla	Lora del Río	2.90	2.65	2.55	3.73

La validez y aplicabilidad de esta metodología ofreció una valiosa herramienta a los responsables públicos en el momento en que hubo que establecer estrategias de lucha frente a fuertes sequías. En estas circunstancias, ante la acuciante falta del recurso, la medida más eficaz debía ser la de mejorar la eficiencia del uso del agua disponible dotando a los usuarios del agua de riego de información y herramientas para el mejor cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos. Las sequías extremas del periodo 1991-1995, por tanto, fueron el germen del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR).

El Sistema de Información Agroclimática para el Regadío fue creado en 1999 por el Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación, quien hoy en día ejerce la titularidad de sistema y sostiene las bases de su funcionamiento. Las Comunidades Autónomas colaboraron desde su origen en la puesta en marcha de la red y hoy en día siguen constituyendo el factor de proximidad con el usuario, componente clave para el éxito del SIAR. El elemento fundamental del sistema es la red de estaciones agroclimáticas: más de 500 estaciones agrometeorológicas de registro automático (360 del Ministerio y 160 de las Comunidades Autónomas, aproximadamente) se encargan de la recopilación de datos meteorológicos representativos de las condiciones en las que se desarrollan los cultivos, para el posterior cálculo de la evapotranspiración de referencia y el registro de la precipitación (Figura 1). Un factor fundamental en cualquier monitorización es la calidad de la información recopilada. Ello depende en primera instancia de dos factores: la utilización de una buena sensorización y un buen programa de mantenimiento de las estaciones. La red SIAR se caracteriza por la utilización de sensores ambientales de una calidad contrastada y aplica un estricto programa de mantenimiento con tres niveles: preventivo, correctivo y de calibración.

La dependencia del cálculo de la ET_0 de parámetros meteorológicos podría dar a entender que en el caso de cultivos que impliquen una modificación del ambiente natural, esta metodología sería de aplicación limitada sin la disposición de datos propios. Nos referimos al caso de cultivos protegidos como invernaderos, mallas, etc. Sin embargo, la pujanza de estos sectores ha

favorecido que surjan propuestas que permiten una estimación bastante acertada de los valores de ET_0 bajo cubierta a partir de datos meteorológicos externos, concretamente la radiación solar (Fernández *et al.,* 2001)

Figura 1. Mapa de ubicaciones y estación de la red de estaciones agroclimáticas del SIAR

2.2. El coeficiente de cultivo (K_c)

El concepto de K_c, introducido por Jensen en 1968, tuvo su espaldarazo en 1977 con la publicación también de la *Serie de Riego y Drenaje de la FAO, No. 24. Las Necesidades de Agua de los Cultivos*. Posteriormente *FAO56* consolidaría el papel del K_c en el cálculo de necesidades hídricas hasta el punto de que esta metodología también se conoce como enfoque de « K_c ET_0». En definitiva, el coeficiente de cultivo introduce en la evapotranspiración de referencia el efecto de las características un cultivo determinado, incluso en cuanto a las prácticas de manejo que se efectúan sobre él (poda, sistema y frecuencia de riego, etc.). La distinta bibliografía científico-técnica contiene multitud de propuestas de K_c aplicables a una amplia gama de cultivos en diversas condiciones. La combinación entre superficie cultivada global e importancia económica determinará la disponibilidad de K_c de un cultivo, así como su nivel de concreción en cuanto la evolución del K_c en las distintas fases fenológicas. El documento *FAO56* propone, para una amplísima lista de cultivos, coeficientes de cultivo desglosados en tres fases: inicio, medio y fin, lo cual permite adaptarse a las distintas etapas en las que evoluciona el cultivo (Tabla 2).

Tabla 2. Coeficiente de cultivo según fase de tres especies. *FAO56*

Cultivo	$K_{c\ ini}$	$K_{c\ medio}$	$K_{c\ fin}$
Apio		1.05	1.00
Almendro	0.40	0.90	0.65
Cítricos	0.65	0.60	0.65

A medida que se profundiza en el estudio de las relaciones hídricas de los cultivos, es posible proponer coeficientes por fases fenológicas con mayor grado de desglose. En cultivos herbáceos, es común encontrar una evolución pareja entre el valor del K_c y el porcentaje de cobertura del cultivo sobre el terreno, con un descenso a partir de la senescencia del cultivo. En cultivos leñosos caducos, hasta brotación y desde caída de la hoja, el K_c es nulo. El resto de las fases, el K_c suele tener una tendencia creciente con, en ocasiones, un punto de inflexión en cosecha hasta caída de la hoja. En el caso de leñosos perennes, el K_c mantiene una ligera tendencia creciente desde inicio de campaña a cosecha, con alguna posible caída puntual debido el efecto de la poda. (Figura 2).

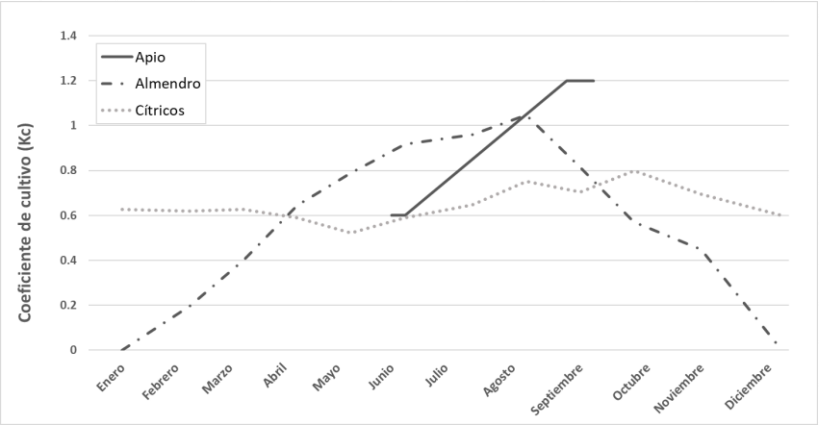


Figura 2. Tres ejemplos de evolución del K_c. Apio (Sánchez L.R., 2004), Almendro (Gomis, J.G. ,2009) y Cítricos (Castel, J.R., 2005)

La practicidad de la metodología de los coeficientes de cultivo ha favorecido que haya transcendido a otras esferas bastante diferentes de la agricultura convencional. Es el caso del paisajismo, en el que ya hay propuestas de K_c para el cálculo de las necesidades hídricas de jardines. La más extendida es la de la Universidad de California, conocida como WUCOLS, por sus siglas en inglés de Water Use Classifications of Landscape Species. En este caso el K_c es conocido como K_e (coeficiente de la especie) y se combina con otros dos coeficientes: K_d (coeficiente de densidad) y K_{mc} (coeficiente de microclima) cuyo producto da como resultado el coeficiente de jardín (Kj).

Como hemos visto en el caso del paisajismo, el K_c puede ser multifactorial. Ello nos permite de nuevo retornar a la agricultura y a *FAO56* para tratar el concepto de coeficiente de cultivo dual. El K_c único tratado hasta ahora podría desglosarse en los dos componentes que determinan el consumo de agua de un cultivo: evaporación y transpiración, expresado como suma del coeficiente de evaporación del agua (K_e) y el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) para describir la transpiración de la planta.

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

La bibliografía suele centrarse en la obtención del coeficiente de cultivo basal, que por comparación con el único permite apreciar, aunque no de manera directa, la participación de la componente evaporativa en el conjunto (Tabla 3).

Tabla 3. Coeficiente de cultivo basal según fase de tres especies. *FAO56*

Cultivo	$K_{cb\ ini}$	$K_{cb\ medio}$	$K_{cb\ fin}$
Apio		0.95	0.90
Almendro	0.20	0.85	0.60
Cítricos	0.60	0.55	0.60

La cuestión de qué aproximación es preferible utilizar, K_c único o dual, surge de inmediato. Por el simple hecho de que el K_c dual ponderaría el efecto de la transpiración y la evaporación dentro del efecto conjunto del cultivo, el K_c dual se elevaría sobre el único en cuanto a fiabilidad y precisión. Sin embargo, los estudios encaminados a su determinación son los menos, con lo cual las fuentes sobre las que consultar no son mayoritarias. El motivo es que la determinación de los dos sumandos implica una mayor complejidad y coste de los estudios, por lo que el K_c dual

queda todavía relegado al ámbito de la investigación, al riego de alta frecuencia en tiempo real o a estudios de cuenca, entre otros. En definitiva, el K_c único acaba resultando más accesible, abarcando mayor número de cultivos en mayor número de circunstancias, lo que lo hace sustancialmente más utilizado que el K_c dual.

A pesar de lo que se ha tratado hasta hora sobre el coeficiente de cultivo, el panorama al que nos enfrentamos es mucho menos sólido que el que ofrece la estimación de la evapotranspiración de referencia. El K_c parece estar muy afectado por las condiciones locales donde se ha obtenido. Factores como el sistema de riego, el desarrollo del cultivo, prácticas de cultivo como el acolchado e incluso las condiciones ambientales pueden limitar la extensión en el espacio (distintas zonas) o en el tiempo (distintas campañas) del K_c, limitando su transferibilidad. Todo ello no hace, sino que recomendar su continua revisión tanto mejor en cuanto sean en condiciones similares a aquellas en las que se pretenden aplicar. Bajo el escenario descrito, puede resultar arduo la selección del coeficiente más adecuado a las necesidades del usuario. En este punto es donde intervienen los llamados Servicios de Asesoramiento al Regante (SAR).

Los SAR son unas estructuras técnicas responsables de articular la llegada efectiva al usuario del agua de riego de toda la información científico-técnica relativa a la mejora de la eficiencia del uso del agua. En España, los SAR son los principales responsables del correcto funcionamiento del SIAR y de que la red de estaciones agroclimáticas sea aprovechada en todo su potencial. Gracias fundamentalmente a sus páginas web, los SAR son los principales valedores de la metodología *FAO56*. Aseguran la calidad de los datos de base para el cálculo de la ET_0, "filtran" de entre un gran número de propuestas de K_c seleccionando -cuando no determinando por sí mismos- las más adecuadas a sus propias realidades agrícolas facilitando, a través de herramientas digitales para la toma de decisiones, recomendaciones de riego en muchos casos gratuitas y personalizadas. Los SAR en España presentan una tipología muy variada. Desde servicios asociados a las estructuras de investigación agraria (Comunitat Valenciana, Andalucía, Región de Murcia, Castilla y León, País Vasco), universidades (Castilla La Mancha), departamentos administrativos (Extremadura, Canarias, Catalunya, La Rioja) o empresas semipúblicas (Aragón, Navarra). El propio Ministerio también asume la labor de asesoramiento en aquellos territorios en los que no existe un SAR como tal (Comunidad de Madrid, Illes Balears, Galicia) y complementa la labor de asesoramiento en aquellos donde sí los hay.

2.3. Nuevas tendencias en el ámbito de la estimación de la ETc

Las nuevas tendencias en este apartado se orientan hacia la sustitución de la fuente de datos de base para el cálculo de la ET_0, pasando de observaciones registradas por las estaciones a la información proporcionada por los distintos modelos de previsión meteorológica ofrecida tanto por organismos públicos como empresas privadas. De este modo, gracias a la mejora de los modelos de previsión meteorológica, se puede obtener una mejor estimación de la exigencia atmosférica a la que va a estar sometido el cultivo, así como de la precipitación, en su caso, que puede determinar el ahorro de riego.

Pero quizás, la disciplina que puede dar un importante impulso a la estimación de la componente evapotranspirativa, el segundo flujo hidrológico más grande sobre la tierra es la teledetección aplicada a los sistemas agrarios.

Teledetección

En los últimos años irrumpe con fuerza la teledetección como herramienta alternativa para el manejo del riego. Se trata de obtener información acerca del cultivo tomando y analizando datos sin que los instrumentos empleados para adquirir los datos estén en contacto directo con las plantas. Las técnicas de teledetección se basan en el tratamiento de imágenes obtenidas, bien con vehículos aéreos no tripulados (drones o aviones) o con satélites. Los métodos basados en teledetección evalúan de distinta forma la radiación electromagnética que reflejan o emiten los cultivos a través del espectro electromagnético, es decir, de sus distintas longitudes de onda.

Dentro de la teledetección, existen dos aproximaciones principales a la hora de abordar la estimación de la evapotranspiración que se diferencian en la naturaleza de los datos de entrada, la física del proceso analizado y la capacidad del modelo para reproducir los diferentes procesos: los modelos basados en índices espectrales de vegetación y los modelos basados en la temperatura del cultivo. Dichas metodologías pueden combinarse entre sí para explotar las potencialidades que cada una de ellas ofrece de manera separada.

a) Modelos basados en índices espectrales de vegetación

Esta tipología de modelos se basa en el fundamento de que existe una relación bien establecida entre los índices de vegetación y el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}), utilizado en el cálculo de la evapotranspiración del cultivo.

Para el establecimiento de dichas relaciones se requiere principalmente información espectral del dominio visible e infrarrojo cercano (400-1000 nm), la cual se encuentra generalmente disponible en la mayoría de las misiones satelitales. Los índices de vegetación generalmente se obtienen mediante expresiones matemáticas, lineales o no lineales, utilizando los datos de reflectancia de las diferentes bandas espectrales obtenidos mediante teledetección. Este tipo de índices diseñados para maximizar la sensibilidad a las características de la vegetación y, al mismo tiempo, minimizar factores de confusión como la reflectancia del suelo subyacente o los efectos atmosféricos, entre otros; ayudando a cuantificar el estado de salud, la densidad y vigor de la vegetación. Entre los índices de vegetación más comunes se encuentran el Normalized Difference vegetation Index (NDVI; Rouse Jr *et al*., 1974), Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI; Huete, 1988), basados en la información recogida en las bandas espectrales correspondientes con las longitudes de onda del rojo e infrarrojo cercano.

Los satélites que disponen de sensores en este rango espectral proporcionan información con una alta resolución temporal, adecuada incluso para realizar interpolaciones a escala diaria, siendo de utilidad a lo largo de todo el ciclo de crecimiento de los cultivos. Sin embargo, la presencia de nubes es una interferencia atmosférica común que puede afectar significativamente los datos de teledetección correspondientes a las regiones del espectro electromagnético del visible y del infrarrojo cercano, especialmente en el contexto de las imágenes satelitales.

Por otro lado, el aumento de la disponibilidad de datos espectrales obtenidos desde diversas plataformas, como satélites, drones o incluso espectrorradiómetros portátiles, permite la complementariedad de información espectral disponible, mejorando así las resoluciones espacial, temporal y espectral. Otra de las ventajas principales de este tipo de metodologías

reside en su fácil aplicabilidad y en la sencilla interpretación de la información resultante proporcionada.

Sin embargo, una de las principales críticas o limitaciones asociadas a los modelos basados en índices espectrales de vegetación es que las relaciones en que se basan son dependientes del cultivo y del lugar al que se aplican, siendo necesario calibrar y validar las mismas cuando se quieren aplicar a cultivos y lugares diferentes de donde se obtuvieron originariamente. Además, a detección de estrés del cultivo con este tipo de aproximación generalmente solo es posible cuando se produce una reducción evidente en el contenido de clorofila, la fracción vegetada o cambios en la arquitectura o geometría del dosel vegetal; por lo que es frecuente que recurrir a metodologías complementarias, como los modelos basados en balances de energía o de agua en el suelo, para tal propósito.

b) Modelos basados en la temperatura del cultivo

Este tipo de modelos se basan en la capacidad de estimar la ET_c, incluso bajo condiciones de estrés hídrico, utilizando como entrada principal la temperatura del cultivo. Específicamente, utilizan la temperatura radiométrica obtenida a partir de sensores térmicos remotos para estimar el flujo de calor sensible y derivar la ET_c como residuo del balance de energía superficial.

En las últimas décadas se han desarrollado diversos modelos que abarcan diferentes grados de complejidad para estimar la ET_c que implican esencialmente dos tipos de esquematización, los modelos de balance de energía de una fuente y de dos fuentes.

En ambos enfoques, la evapotranspiración se deriva en términos de flujo de calor latente instantáneo (λET_c) y se calcula como el residuo de la ecuación de balance de energía superficial:

$$\lambda ET_c = Rn - G - H$$

donde Rn es la radiación neta total; G es el flujo de calor del suelo y H es el flujo de calor sensible, todos ellos expresados en W m^{-2}.

El enfoque de una fuente trata la superficie terrestre como una única capa uniforme (enfoque "hoja grande"; Monteith, 1965) sin hacer distinción entre la componente evaporativa del suelo y la componente transpirativa del dosel vegetal. La diferencia entre los distintos modelos de una fuente se puede resumir en cómo se parametriza el flujo de calor sensible. Durante las últimas décadas, se ha desarrollado una serie de modelos de estimación de ET_c, cada uno con diferentes grados de simplificación y asunciones en la relación de las variables de los datos de entrada del modelo, entre los que destacan el 'Simple Surface Energy Balance model' (Bartholie *et al*., 1972); 'Regional ET Model Using Crop Surface Temperature' (Soer, 1980); 'Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) model' (Bastiaanssen *et al.,* 1998); o 'Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration (METRIC) model' (Allen *et al.,* 2007) entre otros.

Los modelos de balance de energía superficial de doble fuente, por su parte, distinguen entre la transferencia de energía superficial de los subsistemas suelo y vegetación. Este tipo de aproximación fue desarrollada para simular explícitamente los flujos de calor de la vegetación y del suelo por separado, requiriendo para ello una mayor parametrización. De este modo, la principal diferencia entre los dos enfoques de balance de energía superficial radica en la forma en que se utiliza la temperatura radiométrica en el cálculo de los flujos. Mientras que en el

enfoque de una fuente la temperatura de la superficie se deriva únicamente de la temperatura radiométrica, en el esquema de dos fuentes hay una partición de la temperatura del suelo y del dosel, en función de la fracción de cobertura vegetal y el ángulo de observación. Como consecuencia, todos los flujos de energía son calculados considerando el suelo y la cubierta vegetal como componentes separados. Entre los modelos de balance de energía superficial de doble fuente destacan: 'Two-Source Energy Balance (TSEB) model' (Norman *et al*., 1995); 'Atmosphere-Land Exchange Inverse (ALEXI) model' (Anderson *et al*., 1997); y 'Disaggregated ALEXI (DisALEXI) model' (Norman *et al.,* 2003).

c) Integración de índices espectrales de vegetación y térmicos

Por último, cabe destacar que también se han desarrollado métodos relativamente simples que combinan información derivada de los índices de vegetación e información térmica, con el objetivo de aprovechar las ventajas de cada uno de los dos enfoques. Un ejemplo claro de ello son los denominados modelos contextuales, que estiman la fracción de evaporación utilizando exclusivamente datos de teledetección térmica e índices de vegetación. Específicamente, los índices de vegetación se utilizan para derivar la fracción de cobertura vegetal, mientras que la información térmica proporciona sobre el estado hídrico del cultivo. De este modo, se establece un diagrama de dispersión NDVI-LST, generalmente de forma triangular o trapezoidal, en el que el límite inferior del área está formado por los píxeles más húmedos con las temperaturas más bajas de la zona; mientras que el límite superior corresponde con los píxeles que presentan un mayor estrés hídrico y, por tanto, la fracción de evaporación más pequeña, para un valor de NDVI determinado. Entre los modelos contextuales más comunes se encuentran 'Triangle Evaporative Fraction Model' (TEFM) (Goward *et al*., 1985; Price, 1990; Carlson *et al.,* 1995); y el 'Trapezoid Interpolation Model' (TIM) (Moran *et al*., 1994).

En definitiva, la teledetección ha demostrado ser un método excelente para monitorear áreas regadas en varios lugares del mundo bajo diversas condiciones ambientales. Esta tecnología ofrece una visión amplia abarcando numerosas bandas espectrales y con frecuencias temporales adecuadas para estimar, a bajo coste o incluso gratuitamente, el uso de agua de los cultivos a lo largo del ciclo de desarrollo de los cultivos. Además, los datos de archivo disponibles que abarcan varias décadas permiten la realización de análisis temporales. Además, el formato digital de los productos derivados de la teledetección permite su incorporación en Sistemas de Información Geográfica para su síntesis o comparación con otras fuentes de datos.

Entre las aplicaciones prácticas de la teledetección en el ámbito del riego de precisión se encuentran la posibilidad de optimizar la distribución del agua, medir el rendimiento de aplicación del riego, establecer programas de riego, evaluar el consumo de agua, así como comprender la dinámica del riego (Ozdogan *et al.,* 2010). Sin embargo, existen ciertas dificultades a las que se enfrentan las técnicas de teledetección, incluyendo la imposibilidad de proporcionar datos en tiempo real para ayudar con las opciones de programación del riego o la dependencia de la utilidad de las imágenes obtenidas en función de las condiciones atmosféricas (por ejemplo, la nubosidad). Es por ello por lo que es especialmente relevante la integración de la teledetección con sensores instalados en campo y con los recientes avances en Internet de las Cosas, inteligencia artificial, SIG 3D, SIG móvil, big data y aprendizaje automático, simplificando y complementando la recopilación y el procesamiento de datos geoespaciales

3. Suelo. Sensores de Humedad

La programación de riego basada exclusivamente en la estimación de la evapotranspiración del cultivo proporciona información sobre la cantidad de agua a aplicar durante un período de tiempo concreto, pero no cómo fraccionar esa cantidad, factor fundamental de eficiencia en riego. En este punto, unos dispositivos que permitan monitorizar exhaustivamente el estado hídrico del suelo y su evolución en el tiempo pueden resultar altamente útiles a la hora de distribuir unas cantidades de agua dadas en modo de que se adapten tanto a la morfología y profundidad radicular del cultivo, así como a las características texturales y estructurarles del suelo. Estos dispositivos son los sensores de humedad del suelo.

En la actualidad, los sensores de humedad quizás sean el paradigma de la digitalización en el riego de cultivos gracias a que pueden ofrecer una información continua, precisa e intuitiva de la evolución del agua en el suelo, con gran facilidad de interpretación, lo cual los hace fácilmente inteligibles para usuarios nóveles en este tipo de tecnologías de riego.

3.1. Tipos de sensores de humedad del suelo

Los sensores preferentemente utilizados en el control de riego en agricultura comercial son de dos tipos: los que ofrecen la información en potencial mátrico y los que la ofrecen en humedad volumétrica.

El potencial mátrico del suelo (Ψ_m) es uno de los componentes del potencial del agua del suelo (Ψ_{suelo}), normalmente el más importante. El potencial mátrico o matricial se mide en unidades de presión (cBar o kPa) y representa la fuerza (tensión) con la que las moléculas de agua están retenidas en el suelo debido a las fuerzas de atracción entre sus partículas y las moléculas de agua. Esta fuerza es la que, en primera instancia, tiene que vencer la raíz para que la absorción de agua tenga lugar. Por otra parte, la humedad volumétrica (θ) representa el porcentaje en volumen que ocupa el agua respecto al suelo, por ello también podemos encontrarla expresada como VWC (*Volumetric Water Content*) en tanto por uno ($m^3\ m^{-3}$) o directamente en porcentaje (%). Otra manera de expresar la humedad del suelo es en altura de lámina de agua (mm) que, a efectos eminentemente prácticos para la interpretación de la información de los sensores, podemos asimilar a humedad volumétrica.

Sensores de potencial mátrico

Dentro del grupo de sensores que ofrecen la información en potencial mátrico debemos distinguir aquellos que la obtienen directamente de aquellos que lo hacen de manera indirecta. Dentro el primer grupo, encontramos los clásicos **tensiómetros**, en los que el agua confinada en el interior de un tubo entra en contacto con la matriz del suelo a través de una cápsula porosa. El agua se mueve de potenciales mayores (más húmedo, menor tensión) a menores (más seco, mayor tensión) con lo cual, cuanta menos humedad contenga el suelo, más succión ejercerá sobre el agua del interior del tubo, generando así un vacío que puede medirse con un vacuómetro. Los tensiómetros enfocados al riego agrícola están considerados como dispositivos especialmente apropiados cuando no sea necesario medir potenciales bajos, ello implica que sean adecuados para suelos sueltos o riegos de alta frecuencia. Estos dispositivos presentan como ventajas el que son económicos, fáciles de instalar y que la salinidad no afecta a las lecturas. Su principal problema es la necesidad de mantener el tubo lleno de agua.

En cuanto a los dispositivos que de medida indirecta del potencial mátrico, encontramos otro veterano dispositivo, **el sensor de matriz granular**. Este sensor, conocido comúnmente como **Watermark**, es un sensor de resistencia eléctrica que, a través de una ecuación de calibración, ofrece la información en forma de potencial mátrico. Estos sensores consisten en dos electrodos embebidos en un material formado por esferas de arena fina rodeadas de un material poroso sintético. El conjunto se entierra en el suelo y entra en equilibrio con el agua del suelo, permitiendo la corriente eléctrica entre los electrodos. La resistencia eléctrica del material poroso aumenta conforme se seca el suelo, disminuyendo la señal eléctrica registrada por el equipo. Como ventajas presentan su bajo coste, su facilidad de instalación y un rango de operatividad mayor que los tensiómetros (toleran suelos más secos y arcillosos). Por el contrario, les afecta la salinidad del suelo y agua (fertirrigación), no son apropiados en rangos de baja tensión (suelos muy húmedos) y adolecen de cierta lentitud ante los cambios de humedad del suelo. El segundo tipo de dispositivos de medida indirecta del potencial mátrico son los llamados "*tensiómetros sin agua*" o más correctamente **equitensiómetros**. Éstos también disponen de una cápsula porosa pero no con el objeto de poder medir la succión generada por el suelo, sino que, a través de la curva de retención de agua de la propia cápsula, ofrecer el valor de potencial mátrico. Los equitensiómetros soslayan los inconvenientes de los tensiómetros como el rango de funcionamiento y el mantenimiento, si bien, su coste es sensiblemente más elevado (Figura 3).

Figura 3. Sensores de potencial matricial del suelo. Tensiómetro (izq.) y watermark (centro) de Irrometer Company Inc. y equitensiómetro de Delta-T Devices Ltd (der.).

Sensores de humedad volumétrica

En cuanto al segundo grupo de sensores, aquellos que ofrecen el valor de humedad de suelo en humedad volumétrica, aquí es donde encontramos una variedad mucho más amplia que en el anterior. Dentro de este grupo, es mayoritaria la familia de los llamados **sensores dieléctricos**, ya que se basan en la medida de constante dieléctrica o permitividad dieléctrica del suelo.

La permitividad dieléctrica (ε) se define como la capacidad de un material de almacenar una carga eléctrica. Cuando se relaciona con la permitividad del vacío (ε_0) resulta la permitividad relativa o constante dieléctrica (k) que adopta valores de 0 para el aire y de 80 para el agua. En definitiva, a mayor contenido en agua en el suelo, mayor constante dieléctrica. Una ecuación de calibración ofrece el valor de humedad inteligible para el usuario: humedad volumétrica o, en algún caso, altura de agua (mm).

La aparente sencillez que parece deducirse de la base física utilizada por los sensores dieléctricos para estimar la humedad del suelo empieza a diluirse cuando atendemos a los distintos principios de funcionamiento. En este punto el mercado ofrece toda una constelación de siglas

y denominaciones capaces de desalentar al usuario más convencido: FDR, TDT, TDR o impedancia, principalmente.

Las siglas **FDR** corresponden al acrónimo en inglés de Reflectometría de Dominio de Frecuencia, también pueden encontrarse denominadas como **sondas de capacitancia o capacitivas**. Son las más extendidas en el mercado. Se pueden encontrar en distintas tipologías, desde sensores individuales a sondas con varios sensores montados en un bastidor para la exploración simultánea a varias profundidades (sondas multisensor). Dentro de estas últimas, cabe distinguir sondas compactas, de longitud y distribución de sensores fija, o modulares en las que el usuario puede modificar ambas características para adaptarlas al cultivo y suelo a monitorizar (Figura 4).

Figura 4. Sensores dieléctricos FDR en tres tipologías: Individual de Meter Group Inc.(izq.), multisensor compacto de AquaCheck, Pty Ltd. (centro) y multisensor modular de Sentek Ltd. (der.)

Los sensores basados en la técnica de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (**TDR**), supuestamente son algo más precisas que las anteriores, son morfológicamente muy similares a los sensores FDR individuales, hasta el punto de que pueden resultar indistinguibles, encontrándose tanto como sensores individuales como multisensor compacta (Figura 5)

Figura 5. Sensores dieléctricos TDR en dos tipologías: Individual de Acclima, Inc. (izq.), multisensor compacto de Campbell Scientific, Inc. (der.)

El tercer gran grupo de sensores dieléctricos son las sondas **TDT** (Transmisión en el Dominio del Tiempo) que surgen como una mejora de las TDR, con mayor precisión y menor consumo, aunque mayor coste. Su principio de funcionamiento, en cuanto a que requieren de un característico circuito cerrado, hace que no sea frecuente encontrarla en tipología multisensor. Existe algún desarrollo en forma de cinta de hasta 3 metros orientada a la evaluación en horizontal antes que en profundidad (Figura 6)

Por último, las sondas de **impedancia** se consideran las más precisas gracias a su principio de funcionamiento, a la tecnología que integran en sí mismas (microprocesador) y a las ecuaciones que considera en sus cálculos. Sus cuatro varillas son muy características y su precisión y coste determina que sean utilizadas muy frecuentemente como sondas portátiles (Figura 7).

Figura 6. Sensores dieléctricos TDT en tres tipologías: Individual de Acclima, Inc. (izq.), multisensor compacto de RioT Technology Corp. (centro) y en cinta de OnFarm Data Ltd. (der.)

Figura 7. Sensores de impedancia de Stevens Water Monitoring Systems, Inc. (izq.) y Delta-T Devices Ltd. (der.)

3.2. Sensores de instalación fija o portátil

Al hablar de las sondas de impedancia hemos introducido el concepto de portabilidad. En efecto, las sondas pueden utilizarse bien en instalación fija para en medida en continuo o bien de manera portátil. Para esto último las casas comerciales ponen a disposición registradores-visores de datos, comúnmente llamados *displays* que permiten conectar el sensor, registrar las lecturas y posteriormente realizar las descarga en un ordenador. Habitualmente, el tipo de sensores portátiles son utilizados en medidas superficiales, si bien, también podemos encontrar, con mucha menor frecuencia, sensores para lectura en profundidad (Figura 8).

Figura 8. Portabilidad para sensor de Delta-T Devices Ltd. (izq.) y de Sentek Ltd. para medida en profundidad. (der.)

Un sensor portátil implica tener lecturas de manera puntual, sin embargo, suele ser preferible disponer de medidas en continuo, es decir, con una frecuencia lo suficientemente alta (y de manera automática) que permita un grado de detalle de la información de la humedad del suelo que nos permita extraer información muy útil para la toma de decisiones, como veremos en el apartado dedicado a la interpretación de curvas de humedad del suelo.

Para la medida en continuo se requiere de un sensor,o sensores. instalados de manera permanente y conectados a un registrador (*datalogger*) con un intervalo de registro predeterminado, incluso por el propio usuario. El acceso a la información de los sensores muy comúnmente se produce a través de plataformas web que recurren a la nube donde el registrador de campo ha volcado la información vía GPRS o sistemas alternativos.

Con carácter general, hoy en día todos los sensores del mercado ofrecen la posibilidad de lectura en continuo, incluso los tensiómetros, a través del acoplamiento de un transductor de presión que permite trasformar el vacío generado en el interior del tubo en señal eléctrica.

3.3. Diseño de una red de sensorización de humedad del suelo

Un factor clave a la hora de determinar el tipo de sensor más adecuado a las necesidades de la explotación agraria será la inversión global a realizar. Por este motivo es importante saber el número de equipos que serán necesarios para disponer de una información lo suficientemente robusta para que nuestra toma de decisiones también lo sea. Para ello conviene tener en cuenta los siguientes condicionantes.

Número de sensores por punto de control de la humedad del suelo

El primero de ellos debería ser el número de sensores por punto de control. Al menos sería recomendable ubicar un sensor de medida en el área de mayor concentración radicular y otro por debajo de la influencia de las raíces (Figura 9). De esta forma, se monitorizan la eventual infiltración del agua de riego en profundidad y, por tanto, se pueden acotar correctamente los tiempos de riego.

Qué debemos considerar como profundidad radicular y zona de percolación profunda vendrá determinado por la combinación de morfología radicular (ligado a la especie) y la textura del suelo, principalmente. Como valores generales aplicables a especies leñosas en riego localizado podrían ser en el entorno de los 30 cm para cubrir la zona de mayor actividad radicular y 70 cm para el control de drenajes. En el caso de hortícolas, como valores generales, 20 cm y 50 cm, para raíces y drenaje respectivamente.

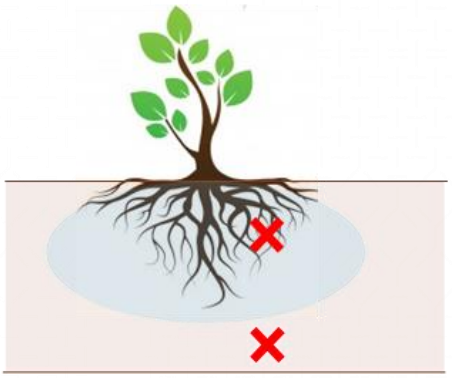


Figura 9. Esquema de sensorización en un punto de control, con un sensor en zona radicular y otro para control de drenaje (aspas rojas)

Naturalmente, las sondas multisensor, habitualmente con una distribución de sensores cada 10 cm, cubren sobradamente este requisito hasta el punto de que, quizás, nos ofrezcan más información de la estrictamente necesaria, lo cual puede resultar interesante por coste, optar por sondas con un menor número de sensores (10, 20, 40 y 60 cm, por ejemplo).

Número de puntos de control en la explotación

El segundo elemento por considerar es el número de puntos de control a instalar en la explotación. Antes que definir una superficie mínima/máxima por punto, lo que debemos conseguir con la distribución de puntos es representatividad de la medida para que así nuestra decisión sobre dosis y modo de aplicación sea de la mayor adecuación posible a la explotación agraria. De este modo, con nuestra distribución de puntos de control, deberíamos cubrir la heterogeneidad existente en la explotación en aquellos elementos de mayor influencia en el comportamiento del agua del suelo en un cultivo: textura del suelo, especie cultivada, grado de desarrollo y sistema de riego. Por cada uno de estos elementos presentes deberíamos instalar un punto como el descrito en el apartado anterior (Figura 10).

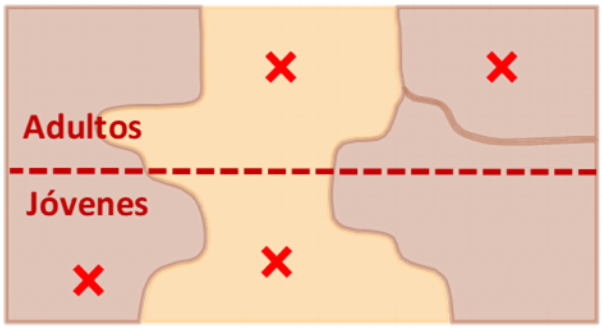


Figura 10. Esquema de sensorización en una explotación con dos grados de desarrollo de la plantación y dos texturas de suelo, Cada punto de control se representa por un aspa rojas

Por último, debemos tener en consideración el hecho de que los sensores de humedad del suelo extraen la información de un volumen de suelo en realidad muy pequeño, normalmente hasta los 10 cm más próximos al sensor. Ello determina que el espacio del cual nos vamos a basar en nuestra decisión de riego puede estar afectado por multitud de factores (compactación, distribución del agua y las raíces, calidad de la instalación, etc.) que es muy probable que introduzcan un componente de variabilidad importante en la medida. Para ello, una recomendación a seguir, una vez tenemos definidos el número de puntos de control, es duplicar (e incluso triplicar) cada punto, en aras de una mayor representatividad de la medida.

3.4. Instalación de sensores de humedad

Hemos visto que un sensor obtiene la información de un espacio muy pequeño a su alrededor, por ello un buen contacto entre suelo y sensor es capital para que la información sea representativa de lo que está ocurriendo con la humedad en el suelo. Para ello debemos garantizar una correcta ubicación del sensor respecto del punto de emisión del agua del sistema de riego y una buena instalación de los equipos en campo.

La posición el sensor depende, en primera instancia, del sistema de riego. En leñosos con riego por goteo, se recomienda la colocación del sensor en posición excéntrica respecto del gotero, a unos 10-15 cm (20-25 cm si es terreno arcilloso), en dirección a la base de la planta y preferiblemente en la zona sombreada por esta (cara norte). En hortícolas con riego por goteo donde las plantas se encuentran muy próximas entre sí, una ubicación adecuada puede ser entre dos goteros. En aspersión, su colocación puede ser algo más problemática por la heterogeneidad que en muchos casos presenta la distribución del agua en parcela. Cabría distinguir entre la cruz del marco de aspersión o entre dos aspersores consecutivos, en cualquier caso, sería

recomendable, y no solo a causa de la instalación de sensores, realizar una evaluación hidráulica de la instalación de riego previa a la puesta de los equipos. Esta recomendación extensible a las instalaciones de goteo, por supuesto.

Respecto de la instalación en campo, es fundamental que el sensor presente un estrecho contacto con el suelo, evitando en todo momento la presencia de bolsas de aire que alterarán las lecturas del sensor y por lo tanto la calidad de la información ofrecida. En sensores cilíndricos (sondas multisensor y tensiómetros) lo ideal es realizar un orificio de acceso algo más estrecho que el propio diámetro del sensor y de una profundidad algo mayor. De este modo, al insertar el sensor, éste quedará en íntimo contacto con el suelo, sellando la base la tierra arrastrada en la inserción. Frente a terrenos pedregosos o muy compactados, es preferible garantizar un buen contacto entre suelo y sensor mediante la elaboración de un barrillo o lechada (*slurry*) con el propio suelo extraído del orifico con el que rellenaremos este a fin de que, una vez instalado el sensor, la pasta rellene todos los espacios que pueda ocupar el aire y evitar así alterar así la lectura de humedad del suelo. Figura 11.

Figura 11. Representación de sensores cilíndricos instalados con aplicación de barrillo (J. Oliva)

En el caso de los sensores individuales, la instalación implica la apertura de una pequeña zanja que permita maniobrar con comodidad la hora de instalar los sensores más profundos. Es preferible que el sensor se inserte en el perfil no alterado por la excavación antes que se deposite en el fondo de la zanja y luego sea cubierto por la tierra extraída. También es recomendable identificar muy bien la posición del sensor (piquetas o varas) puesto que una vez tapada la zanja, resulta muy difícil su localización precisa frente a cualquier incidencia (Figura 12).

Figura 12. Instalación de sensores individuales en riego subterráneo (izq.) y marcado de su posición una vez cerrada la zanja (der.)

3.5. Interpretación de las curvas de humedad del suelo

Pero, ¿cómo nos ofrece un sensor de humedad la información del estado de humedad del suelo? La información de los sensores de humedad normalmente se representa un gráfico Humedad /Tiempo en el que, si la red de puntos ha estado bien diseñada e instalada, podremos evaluar el nivel de humedad del suelo, su evolución y la influencia de la actividad radicular del cultivo, las condiciones ambientales y los tiempos de riego aplicados (Figura 13).

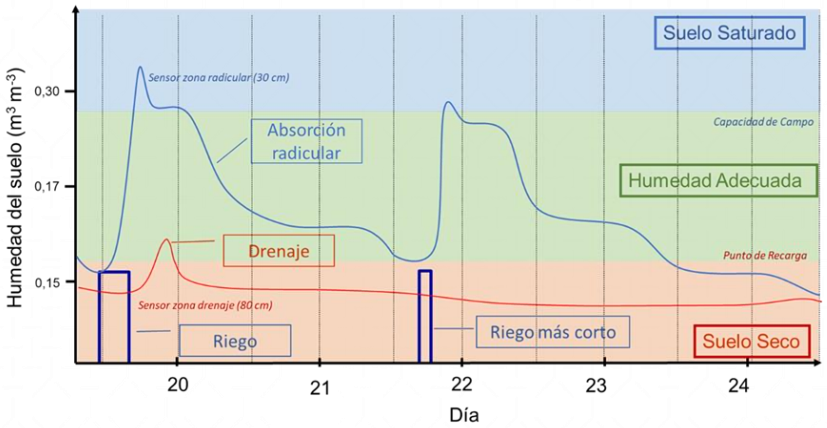


Figura 13. Curvas de humedad del suelo representada a partir de la información de los sensores de humedad del suelo

En definitiva, se debe controlar que el contenido de humedad en la zona radicular se sitúe, con carácter general, entre un límite superior en el que el suelo estaría saturado y uno inferior que corresponde al inicio del estrés para la planta. Simultáneamente, el sensor más profundo no debe detectar los eventos de riego, señal de que el agua no está llegando allá donde no hay raíces. Será la información que proporcione el sensor de drenaje la que limite la duración de los riegos. Una vez establecido el tiempo de riego óptimo (dosis) para la unidad suelo-planta, se deberá modificar el número de riegos (frecuencia) para proporcionar el agua necesaria para cubrir las necesidades de riego del cultivo.

3.6. Umbrales de gestión de la humedad del suelo

Por lo que puede deducirse del párrafo anterior, es importante disponer de los umbrales entre los cuales mantener la humedad de nuestro suelo. En este punto encontramos ciertas diferencias entre los sensores de potencial mátrico y los sensores de humedad volumétrica.

Los sensores de potencial mátrico, en este aspecto, presentan una ventaja debido a que los límites de gestión (superior e inferior) vienen bastante bien definidos en la documentación que ofrecen las casas comerciales. El motivo es que al tratarse de energía con la que el suelo retiene el agua, está mucho mejor caracterizada en la literatura científica, incluso especificando el tipo de suelo (Tabla 4).

Tabla 4. Umbrales de gestión para riego localizado. Adaptado de Irrometer Company Inc.

	Umbrales (kPa)	
Textura del Suelo	**Superior**	**Inferior**
Arenoso	10	35
Franco	10	50
Arcilloso	15	60

Sin embargo, para el caso de las sondas volumétricas, la obtención de unos valores de referencia absolutos es algo más complejo, ya que la intervención de la textura del suelo es aún más importante que en el caso de los sensores de potencial. Existen multitud de tablas que ofrecen valores de capacidad de campo (umbral superior) según el tipo de suelo. No así del valor del punto de recarga, de referencias difíciles de encontrar, y que no debemos confundir con el punto de marchitez permanente. El punto de recarga es el valor de humedad del suelo a partir de cual la planta entendemos que puede padecer estrés, mientras que el punto de marchitez permanente en el valor límite de humedad del suelo a partir de cual la planta sufre daños irreparables e incluso muere, lógicamente un punto al que nadie quería llevar su cultivo. Lo recomendable cuando trabajamos con sensores volumétricos (y en cierto modo, con todos) es trabajar con valores relativos obtenidos a partir del historial de uso de cada punto en concreto. A lo largo del tiempo, un punto de sensorización nos propondrá valores de saturación (tras unas lluvias abundantes), valores de capacidad de campo (a 24-48 horas desde un evento de saturación) y valores mínimos para los cuales el cultivo no ha padecido estrés hídrico. Estos valores de referencia, propios de cada sensor, deben ser revisados periódicamente cuando las circunstancias lo permitan, de modo que cada vez nuestros umbrales de gestión sean más representativos, pudiendo llegar incluso hasta poder definirlos por fase de cultivo.

3.7. Tendencias de futuro en sensorización de humedad del suelo

Las tendencias a futuro en el ámbito de los sensores de humedad del suelo giran alrededor de dos aspectos: el abaratamiento de costes y la aplicación de algoritmos predictivos para la automatización del riego asociados a plataformas de asesoramiento complejas.

Una de las grandes barreras a las que se enfrentan los sensores de humedad del suelo para llegar finalmente al campo es su coste. Hoy en día, el usuario del agua de riego todavía percibe un escaso retorno de la inversión en equipos para la mejora de la eficiencia en riego. Las causas de ello pueden estar en el precio del agua en algunas zonas y la escasa rentabilidad general de las producciones agrícolas. En este contexto, una estrategia competitiva con mucho potencial es el desarrollo de equipos sencillos y accesibles incluso para pequeños agricultores, existiendo líneas de financiación pública específicas para este concepto que han dado lugar a proyectos que han explorado está línea de trabajo. En cualquier caso, a la hora de elegir un equipo de sensorización de humedad de suelo, no debemos guiarnos exclusivamente por su precio, sino que también debemos valorar conceptos como servicio postventa, asesoramiento inicial para la interpretación de la información y la calidad de la plataforma de visualización de datos.

Los sensores de humedad del suelo hoy en día suelen estar integrados en plataformas web que ofrecen, con mayor o menor acierto, la información de la humedad del perfil de suelo. La calidad y claridad de la información ofrecida, así como su versatilidad y adaptabilidad a las necesidades concretas del usuario debe ser un criterio de elección tanto o más importante que el propio sensor, ya que de ello puede depender nuestra decisión de **cuándo, cuánto y cómo regar**. Un paso más allá de las meras plataformas son lo que se ha dado en denominar los “gemelos digitales”. Un gemelo digital intenta ser una réplica virtual de una realidad, por ejemplo un sistema agrícola, sobre el cual es posible plantear escenarios (de riego, en este caso) futuros obteniendo una estimación más o menos precisa de cuál será la respuesta. En los gemelos digitales se integran las nuevas técnicas de inteligencia artificial como el desarrollo de algoritmos que integran capacidad de aprendizaje (*machine learning*) pero de que deben, al menos por

ahora, recurrir a información captada de la realidad. Ahí es donde los sensores de humedad del suelo todavía ejercen un papel preponderante en cuanto al riego se refiere. Los datos meteorológicos hoy en día son de fácil acceso, tanto observaciones como predicciones, y la información de estado hídrico del cultivo, como se verá en el apartado siguiente, todavía no alcanzan un grado de operatividad necesario equiparable a la sensorización de suelo.

4. Planta. Monitorización del estado hídrico de un cultivo

Los indicadores del estado hídrico de los cultivos resultan de gran utilidad para lograr una gestión eficiente del riego, ya que integran el continuo suelo-planta-atmósfera (SPAC). El estado hídrico de la planta engloba tanto la disponibilidad de agua en el suelo como la demanda evapotranspirativa de la atmósfera (ET_0) y la respuesta a ellas de la especie vegetal en cuestión. El agua en el interior de la planta se encuentra a una energía potencial, denominada potencial hídrico de la planta (Turner, 1981). Conceptualmente, las moléculas de agua poseen una energía libre que les permite realizar trabajo, concretamente, que el agua pueda fluir a través del SPAC a favor del gradiente de potencial hídrico, desde el suelo a la atmósfera.

La determinación del estado hídrico de los cultivos se puede realizar midiendo directamente el potencial hídrico de la planta o indirectamente a partir de otros indicadores. A continuación, se enumeran las técnicas más empleadas para su determinación, destacando sus principales ventajas e inconvenientes.

4.1. Tipos de sensores de planta

Cámara de presión

El potencial hídrico del cultivo (Ψ) es el indicador más ampliamente empleado para determinar el estado hídrico de las plantas. Se suele medir empleando una cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965). Si se mide antes del amanecer, se denomina Ψ_{alba}, que puede utilizarse como indicador del Ψ_{suelo}. Si se mide al mediodía solar en hojas expuestas al sol, se denomina Ψ_{hoja}. El Ψ_{hoja} depende en gran medida del ambiente circundante de cada hoja en particular, lo que incrementa la variabilidad en las determinaciones. Para mejorar la estabilidad de la medida, se suele medir día en hojas previamente (≈1 hora) cubiertas con bolsas de cierre hermético y opacas, Ψ_{tallo}, ya que, de este modo, la hoja deja de transpirar y equilibra su potencial hídrico con el potencial hídrico del tallo. Su medición consiste en cortar la hoja por el peciolo e introducirlo en el interior de una cámara de cierre estanco, de modo que el peciolo quede hacia el exterior. Se aire presión en la cámara y cuando se observa savia en el corte del peciolo se anota la lectura del manómetro.

Entre las desventajas del uso de la cámara de presión cabe destacar que es una determinación que requiere de personal cualificado y adoptar las correspondientes medidas de seguridad por trabajar con gases a presión. Además, su determinación es laboriosa ya que se realiza manualmente, lo que limita el número de plantas que pueden ser medidas y además es destructiva, en tanto que hay que escindir la hoja a medir. No obstante, la cámara de presión resulta relativamente barata, es portátil, robusta y requiere poco mantenimiento (Figura 14).

Figura 14. Cámaras de presión de Solfranc Tecnologías SL (izq.), PMS Instrument Company, (centro) y Soilmoisture Equipment Corp. (der.).

La gran ventaja de la cámara de presión es la disponibilidad de umbrales de referencia en multitud de cultivos (Tabla 5). La estabilidad y representatividad de la medida, hace que todavía hoy se le considere, en términos generales, como el parámetro de referencia respecto del cual se validan prácticamente todas las tecnologías que aparecen en este apartado.

Tabla 5. Umbrales de potencial de tallo de algunos cultivos estudiados por el IVIA

	Umbrales de estrés moderado	
Cultivo	**Valor (MPa)**	**Referencia**
Cítricos	-1.2	Ballester *et al*. (2011, 2013)
Granado	-1.4	Intrigliolo *et al*. (2011)
Caqui	-1.2	Badal *et al.* (2010)

Psicrometría

Los psicrómetros evalúan las propiedades termodinámicas y del comportamiento de las mezclas de aire y vapor de agua, particularmente en lo que respecta a su temperatura, humedad, presión y volumen. Es decir, que mediante la instalación de un higrómetro en el tronco del cultivo y corrigiendo con el gradiente de temperaturas internas se determina el potencial hídrico (Dixon y Tyree, 1984).

La ventaja de estos sensores es que están diseñados para medir el Ψ_{tallo} continuamente. Entre sus desventajas destaca la dificultad de instalación y que sólo se puede instalar en especies leñosas, así como la fragilidad del sensor y su elevado coste (Figura 15).

Figura 15. Psicómetro de tronco de ICT International Pty Ltd

Flujo de savia

Los sensores de flujo de savia determinan el movimiento ascendente de la savia a través de los vasos del xilema. Este flujo es proporcional a la transpiración de la planta, lo que está relacionado con el estado hídrico del cultivo. Existen diferentes tecnologías para su medición,

sensores invasivos o no invasivos, así como diversas metodologías de cálculo (Escalona y Ribas-Carbó, 2010). En general, aportan información muy sensible del estado hídrico de los árboles, con un mínimo de flujo de la savia durante la noche y un máximo a medio día (Figura 16).

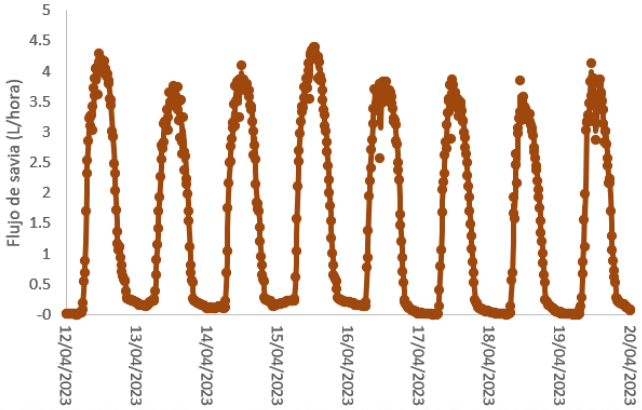


Figura 16. Evolución del flujo de la savia de un árbol de almendro medida con sensores de tipo invasivos y calculado mediante el método del pulso compensado de calor (*CHP*)

La principal ventaja de estos sensores es que no son caros y proporcionan información en continuo. La principal desventaja de los sensores de flujo de savia es requieren de calibración y por ello se emplean principalmente en investigación. Figura 17.

Figura 17. Sensores de flujo de savia de Implexx Sense (izq.) y Environmental Measuring Systems s.r.o.(der.)

Dendrometría

La dendrometría consiste en medir los cambios en el diámetro del tronco a lo largo del día. Por tanto, sólo es aplicable a cultivos leñosos en los que los procesos de hidratación/deshidratación del floema durante el día/noche impliquen una contracción del tronco. La evaluación de las variaciones de tamaño del tronco sirve como indicador del estado hídrico de los cultivos. En particular, la contracción máxima diaria del tronco (MDS) ha demostrado ser un indicador muy sensible del estado hídrico de los cultivos (Fernández y Cuevas, 2010). El diámetro del tronco tiende a contraerse durante las horas centrales del día y se recupera durante la noche. De esta evolución se puede calcular la máxima contracción diaria (MDS), como diferencia entre el máximo diámetro diario del tronco y el mínimo (Figura 18). Por otra parte, los dendrómetros también capturan el crecimiento del tronco, pudiéndose calcular la tasa de crecimiento (CT), como diferencia entre los máximos diarios alcanzados por el tronco en dos días consecutivos.

La principal ventaja de la dendrometría es que puede automatizarse fácilmente mediante la transformación de la medida de las variaciones de grosor del diámetro de un tronco o rama a señales eléctricas. Además, son relativamente baratos y sencillos de instalar. Como principal desventaja destaca la elevada variabilidad de la determinación en función de la ubicación donde se instale el sensor en el tronco, lo que dificulta la interpretación de los datos obtenidos. Esta

variabilidad en las señales obtenidas recomienda la instalación de múltiples sensores en una misma parcela (Figura 19).

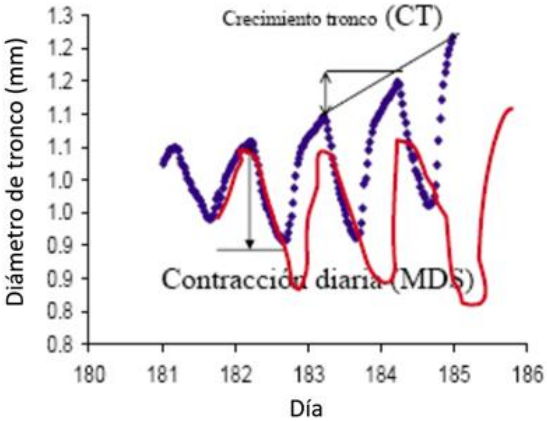


Figura 18. Evolución del diámetro del tronco medida con un dendrómetro

Figura 19. Dendrómetros de tronco de Verde Smart Corporación SL (izq.) y Ecomatik GmbH (der.)

Presión de turgencia foliar

La turgencia foliar se determina midiendo la presión ejercida por el contenido celular contra la pared celular, lo que está relacionado con el nivel de hidratación de las células de las hojas del cultivo. Este tipo de sondas miden la presión de turgencia foliar (Pp), que está inversamente correlacionada con la presión de turgencia (Martínez-Gimeno *et al*., 2017). Esto se puede medir empleando un sensor que consta de dos imanes que de forma no invasiva ejercen presión sobre la hoja (Figura 20). De esta manera, se puede medir de forma continua los cambios de presión de turgencia de las hojas de cultivos hortícolas y frutales, que están relacionados con su estado hídrico (Figura 21).

Figura 20. Sensores de turgencia foliar de Agrihouse Brands ltd (izq) y Yara International ASA (der).

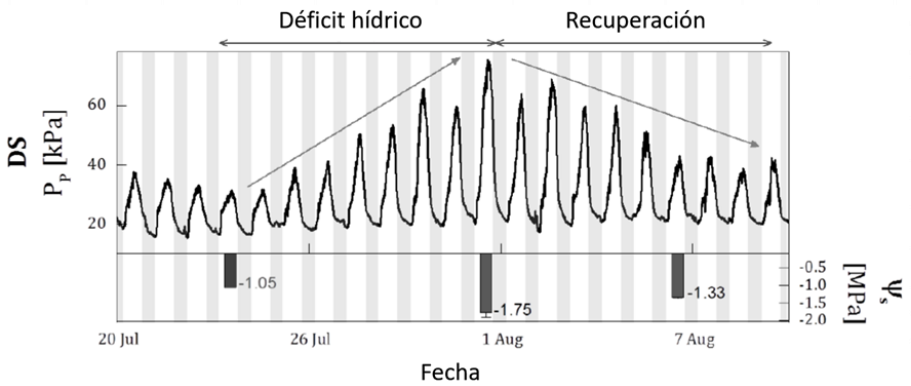


Figura 21. Evolución de la presión de turgencia foliar (Pp) en un árbol de cítricos durante el periodo de déficit hídrico (23 al 31 de julio) y el periodo de recuperación (1 al 10 de agosto). Las columnas de fondo sombreado indican las horas nocturnas (adaptado de Ballester *et al.* (2017))

Estas sondas son baratas y robustas, pero requieren reubicarse periódicamente y la interpretación de sus datos requiere de conocimiento experto.

Fluorescencia de la clorofila

La fluorescencia de la clorofila es un fenómeno óptico que implica la emisión de luz por parte de la clorofila cuando es excitada por la absorción de luz. La clorofila es el pigmento principal responsable de la captura de la luz durante el proceso de fotosíntesis. Por lo tanto, la fluorescencia de la clorofila puede ser medida a nivel de hoja utilizando un fluorímetro portátil y utilizada como una herramienta para estudiar la eficiencia de la fotosíntesis de las plantas y puede utilizarse para evaluar el estrés. Concretamente, los equipos de fluorescencia de clorofilas son capaces de medir la luz fluorescente y aportar información sobre la fase luminosa de la fotosíntesis. Es decir, permiten determinar la eficiencia de la transferencia de energía en los fotosistemas en los cloroplastos, lo que está relacionado con el estrés hídrico que sufren los cultivos (Figura 22).

Los fluorímetros son sensores caros y sensibles, cuyos datos requieren de interpretación experta para que sirvan como indicadores del estado hídrico de los cultivos.

Figura 22: Fluorímetros de Walz Photosynthesis Instruments (izq.) y LI-COR Inc (der.).

Termografía

La medición de la temperatura del dosel vegetal mediante tecnología infrarroja sirve como indicador del estado hídrico de los cultivos. Las plantas con déficit de agua en el suelo cierran los estomas, reduciendo la transpiración y, por tanto, disminuyendo la refrigeración de la hoja. Esta tecnología se puede automatizar o medir puntualmente. Actualmente, se han desarrollado cámaras térmicas que conectadas a teléfonos móviles inteligentes permiten su uso sobre en

campo para la estimación del estado hídrico de los cultivos (Petrie *et al*. 2019). Además, basándose en la reflectancia del dosel vegetal del infrarrojo, se han desarrollado índices de estrés hídrico de los cultivos. Por ejemplo, como el CWSI, que sirven para cuantificar el nivel de estrés hídrico de los cultivos normalizándolo a las condiciones meteorológicas en el momento de medida. Los valores de CWSI oscilan entre 0 y 1. Los valores próximos a 0 representan plantas bien regadas y los valores próximos a 1 representan plantas severamente estresadas.

La termografía aplicada al riego es una tecnología muy prometedora, sin embargo, todavía está en una fase muy inicial en cuanto a su aplicación práctica. Los sensores por otra parte, son todavía de elevado coste, compleja instalación y difícil interpretación (Figura 23)

Figura 23. Sensor de infrarrojos de Apogee Instruments Inc.

Análisis de gases por infrarrojos

Mediante analizadores de gases por infrarrojos (IRGA) o mediante sensores de humedad (porómetros) se pueden medir las tasas de intercambio gaseoso de la planta a nivel foliar. Es decir, comparar las concentraciones de agua que salen a través de los estomas de las hojas en comparación a las concentraciones atmosféricas para calcular la transpiración. Este parámetro está íntimamente relacionado con la regulación estomática del cultivo, que a su vez depende de su potencial hídrico, y, por tanto, sirve como indicador de su estado hídrico. No obstante, los valores de conductancia estomática varían mucho entre cultivos, por lo que para emplear estas determinaciones como indicador del estado hídrico hay que revisar la bibliografía específica para cada cultivo.

Estas tecnologías son bastante caras, complejas de utilizar y requieren calibraciones y operaciones de mantenimiento frecuentes, con lo que todavía no parecen tener cabida en agricultura comercial. Figura 24

Figura 24. IRGA de LI-COR Inc (izq.) y porómetro de Meter Group Inc (der.)

4.2. Consideraciones generales al uso de sensores de estado hídrico de los cultivos

Generalmente la estimación del estado hídrico de los cultivos suelen ser determinaciones complejas y tediosas. Cuando se automatizan requieren de una fuente de alimentación, lo que en campo puede suponer una limitación. Además, la mayoría de los sensores requieren de calibración e interpretación de los datos que aportan, lo que limita su uso a escala comercial.

Además, como sensores sobre el terreno, proporcionan información puntual de una hoja o planta concreta. Es decir que sus datos tienen una distribución espacial muy reducida y, por tanto, su eficacia dependerá de la variabilidad espacial del estado hídrico en la parcela de cultivo.

Otro importante condicionante es la distribución temporal de los datos que aportan. Las mediciones que son automatizables tienen la gran ventaja de que pueden determinar la evolución el estado hídrico de los cultivos a lo largo de todo el ciclo de cultivo. Por el contrario, las determinaciones puntuales requieren de una frecuencia de medición suficiente como para recoger los efectos de la programación del riego, las lluvias o las olas de calor.

Por último, muchas de los sensores descritos no de terminan el potencial hídrico del cultivo directamente sino a través de variables indirectas. Este hecho, hace que estén sujetas a incertidumbres que disminuyen su precisión en la determinación del estado hídrico de los cultivos.

4.3. Nuevas tendencias en sensorización de la planta

Recientemente se han desarrollado tres nuevos tipos de sensores para la determinación en continuo del estado hídrico de los cultivos que pueden ayudar a agricultores, técnicos e investigadores a mejorar la comprensión de las relaciones hídricas dentro del SPAC y, por tanto, a la programación eficiente del riego.

Microtensiómetros

Los microtensiómetros puede medir continuamente el potencial hídrico del tallo de la planta basándose en un sensor de presión microelectromecánico (Conesa *et al*., 2023). El sensor se incrusta en el tronco y mide en continuo y de forma automatizada el potencial hídrico del tallo (Figura 25). Los microtensiómetros son una tecnología muy prometedora para la medición del potencial en cultivos leñosos que está siendo contrastada en numerosas especies.

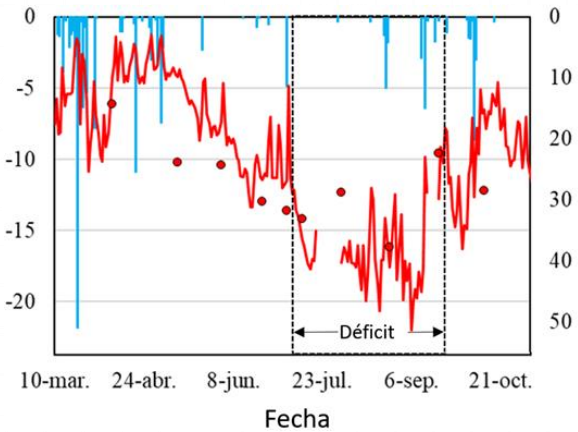


Figura 25. Evolución del potencial hídrico de xilema en un árbol de cítricos medido con un microtensiómetro (línea roja), medidas puntuales del potencial hídrico (círculos) y precipitaciones (barras azules)

Dada su novedad, falta por confirmar su sensibilidad, estabilidad y precisión en el tiempo. Además, su elevado coste actualmente dificulta su implementación a nivel comercial. La correcta instalación del sensor reviste cierta dificultad y la viabilidad de reinstalación aún está por determinar. Además, la altura del árbol a la que se inserta el sensor parece influir en la medida. Figura 26.

Figura 26. Microtensiómetro de FloraPulse Co.

Sensores capacitivos de hoja

Los sensores capacitivos de hoja pueden servir indicador del estado hídrico de los cultivos mediante la medición de la conductancia de la hoja. Para ello se instala un sensor de capacitancia en la hoja para monitorizar de forma continua la transpiración foliar y la radiación solar. El sensor detecta el vapor de agua de condensación originado por la transpiración de la hoja aprovechando un gradiente de temperatura pasivo a través de la hoja iluminada por el sol y la placa del sensor situada debajo, midiendo simultáneamente la radiación solar incidente. El dispositivo es sencillo y de bajo coste y permite evaluar cualitativamente el estado hídrico de las plantas comparando los patrones diurnos de transpiración de las hojas y de irradiación solar. Esta tecnología se ha testado con éxito en diversas especies bajo restricciones hídricas no muy severas. Falta confirmar en condiciones de mayor estrés hídrico de los cultivos y en especies con bajas tasas de transpiración foliar. Figura 27

Figura 27. Sensores capacitivos de hoja. (Thalheimer, 2022)

Sensores de ultrasonidos sin contacto

Los sensores de ultrasonidos sin contacto o acoplados al aire llevan aplicándose al estudio del estado hídrico de las hojas de plantas desde 2009 (T.E.G. Álvarez-Arenas *et al*., 2009). Se basan en la propagación de ondas de ultrasonidos a través de la hoja, que se coloca entre un sensor transmisor y un receptor, dejando un espacio (aire) entre ellos. Los cambios que se producen en la señal recibida se demostraron estar directamente relacionados con la presión de turgencia y la microestructura de los tejidos que forman la hoja, entre otros. A través de diferentes técnicas, han mostrado su gran capacidad para obtener información del comportamiento mecánico de la hoja íntimamente relacionada con su estado hídrico, de una forma no invasiva, no destructiva y rápida. En los últimos años, se ha encontrado que parámetros ultrasónicos obtenidos de forma inmediata de las medidas en campo, correlacionan con la potencial hídrico, siendo además sensibles para la detección temprana de estrés hídrico en cultivos de cítricos (Fariñas *et al.,* 2021). Actualmente, se está trabajando en su aplicación en cultivos isohídricos (Figura 28).

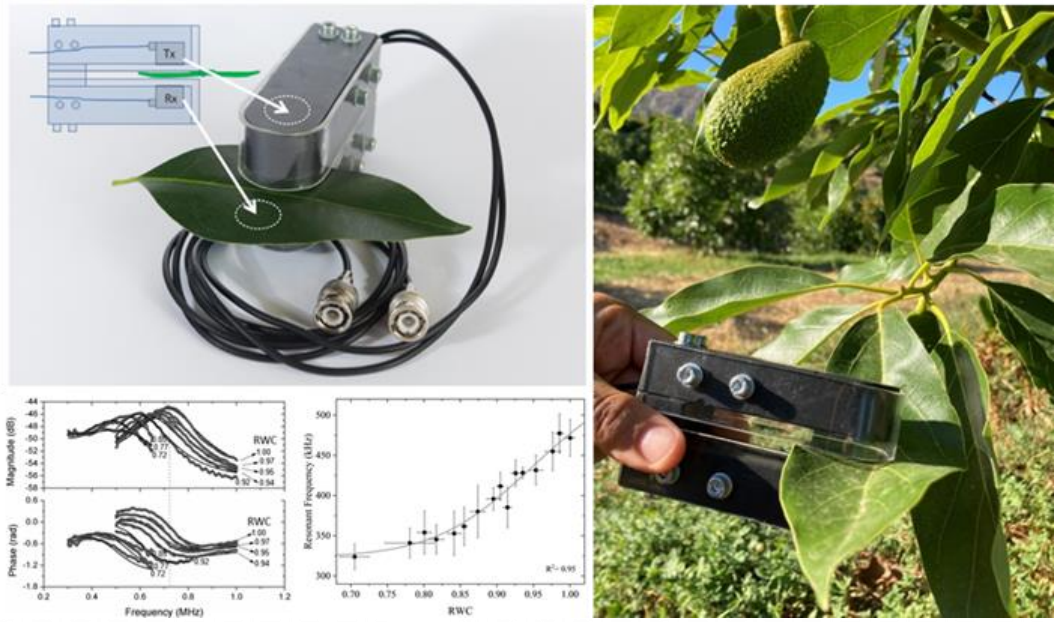


Figura 28. Sensores de ultrasonidos sin contacto.

Bibliografía

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, pp. 300.

Allen, R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-Model. Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE 133, 380–394.

Anderson, M.C.; Norman, J.M.; Diak, G.R.; Kustas, W.P.; Mecikalski, J.R. (1997). A two source time-integrated model for estimating surface fluxes using thermal infrared remote sensing. Remote Sens. Environ. 60, 195–216.

Badal, E.; Abd El-Mageed, T. A.; Buesa, I.; Guerra, D.; Bonet, L.; Intrigliolo, D. S. (2013). Moderate plant water stress reduces fruit drop of “Rojo Brillante” persimmon (Diospyros kaki) in a Mediterranean climate. Agricultural water management, 119, 154-160.

Ballester, C.; Castel, J.; Intrigliolo, D. S.; Castel, J. R. (2011). Response of Clementina de Nules citrus trees to summer deficit irrigation. Yield components and fruit composition. Agricultural Water Management, 98(6), 1027-1032.

Ballester, C.; Castel, J.; Intrigliolo, D. S.; Castel, J. R. (2013). Response of Navel Lane Late citrus trees to regulated deficit irrigation: yield components and fruit composition. Irrigation Science, 31, 333-341.

Bartholie, J.F.; Namken, L.N.; Wiegand, C.L. (1972). Aerial thermal scanner to determine temperatures of soils and of crop canopies differing in water stress. Agron. J. 64, 603–608.

Bastiaanssen, W.G.M.; Menenti, M.; Feddes, R.A.; Holtslag, A.A.M. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL) - 1. Formulation. J. Hydrol. 213, 198–212.

Castel, J. R.; de Recursos Naturales, E. (2005). Evapotranspiración, balance de energía y coeficiente de cultivo de plantaciones de cítricos en Valencia. Monografías INIA. Agrícola (España), (17).

Conesa, M.R.; Conejero, W.; Vera, J.; Ruiz-Sánchez, M.C. (2023). Assessment of trunk microtensiometer as a novel biosensor to continuously monitor plant water status in nectarine trees. Frontiers in plant science 14.

Dixon, M.A.; Tyree, M.T. (1984). A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb. Plant, Cell & Environment 7, 693-697.

Doorenbos, J; Pruitt, W.O. (1977). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. FAO, Rome, 194 pp.Escalona, J. M., & Ribas-Carbó, M. (2010). Methodologies for the measurement of water flow in grapevines. Methodologies and results in grapevine research, 57-69.

Fariñas, M. D.; Martínez-Gimeno, M. A.; Badal, E.; Tasa, M.; Bonet, L.; Manzano-Juárez, J ; Pérez-Pérez, J. G. (2021). Evaluation of ultrasonic parameters as a non-invasive, rapid and in-field indicator of water stress in Citrus plants. Agricultural and Forest Meteorology, 310, 108651.

Fernández, M.D.; Orgaz, F.; Fereres, E.; López, J.C.; Céspedes, A.; Pérez-Parra, J.; Bonachela, S.; Gallardo, M. (2001). Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español. Cajamar (Caja Rural Intermediterránea), Almería, España, 78 pp.

Fernandez, J.E.; Cuevas, M.V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. Agr. For. Meteorol. 150, 135-151.

Garrido, A.; Perez-Pastor, A. (2019). El regadío en el mediterráneo español. Una aproximación multidimensional. CajaMar Caja Rural.

Gómez Álvarez-Arenas, T. E.; Sancho-Knapik, D.; Peguero-Pina, J. J.; Gil-Pelegrín, E. (2009). Noncontact and noninvasive study of plant leaves using air-coupled ultrasounds. Applied Physics Letters, 95(19).

Gomis, J. G. (2009). Requerimientos hídricos del almendro y respuesta productiva al riego: aumentando las zonas húmedas en el suelo se incrementa el volumen de copa y la producción. Vida rural, (291), 28-31.

Intrigliolo, D. S.; Bonet, L.; Nortes, P. A.; Puerto, H.; Nicolás, E.; Bartual, J. (2013). Pomegranate trees performance under sustained and regulated deficit irrigation. Irrigation Science, 31, 959-970.

Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ. 25, 295–309.

Martínez-Gimeno, M.; Castiella, M.; Rüger, S.; Intrigliolo, D.; Ballester, C. (2017). Evaluating the usefulness of continuous leaf turgor pressure measurements for the assessment of Persimmon tree water status. Irrigation Science 35(2): 159-167.

Menenti, M.; Choudhury, B. (1993). Parameterization of land surface evaporation by means of location dependent potential evaporation and surface temperature range. Proceedings of IAHS conference on Land Surface Processes, IAHS Publ. 212: 561-568.

Norman, J.M.; Kustas, W.P.; Humes, K.S. (1995). A two-source approach for estimating soil and vegetation energy fluxes from observations of directional radiometric surface temperature. Agric. For. Meteorol. 77, 263–293.

Norman, J.M.; Anderson, M.C.; Kustas, W.P.; French, A.N.; Mecikalski, J.R.; Torn, R.D.; Diak, G.R.; Schmugge, T.J.; Tanner, B.C.W. (2003). Remote sensing of surface energy fluxes at 101-m pixel resolutions. Water Resour. Res. 39. https://doi.org/10.1029/2002WR001775

Ozdogan, M.; Yang, Y.; Allez, G.; Cervantes, C. (2010). Remote sensing of irrigated agriculture: Opportunities and challenges. Remote Sensing, 2(9), 2274–2304.

Petrie, P.R.; Wang, Y.; Liu, S.; Lam, S.; Whitty, M.A.; Skewes, M.A. (2019). The accuracy and utility of a low cost thermal camera and smartphone-based system to assess grapevine water status. Biosys. Eng. 179, 126-139.

Roerink, G.J.; Su, Z., Menenti, M. (2000). S-SEBI: a simple remote sensing algorithm to estimate the surface energy balance. Physics and Chemistry of the Earth. Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere 25, 147–157.

Rouse Jr, J. W.; Haas, R. H.; Deering, D. W.; Schell, J. A.; Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation (No. E75-10354).

Sánchez, L. R. (2004). Planificación de la fertirrigación del apio. Vida rural, (198), 66-70.

Scholander, P.F.; Bradstreet, E.D.; Hemmingsen, E.A.; Hammel, H.T. (1965). Sap Pressure in Vascular Plants. Science 148, 339-346.

Soer, G.J.R. (1980). Estimation of regional evapotranspiration and oil moisture conditions using remotely sensed crop surface temperatures. Remote Sens. Environ. 9, 27–45.

Su, Z. (2002). The Surface Energy Balance System (SEBS) for estimation of turbulent heat fluxes. Hydrol. Earth Syst. Sci. 6, 85–99.

Thalheimer, M. (2022). A leaf-mounted capacitance sensor for continuous monitoring of foliar transpiration and solar irradiance as an indicator of plant water status, Journal of Agricultural Engineering, 54(1).¡

Turner, N.C. (1981). Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. Plant Soil 58, 339-366

Estrategias de resistencia a sequía: una guía a la adaptación vegetal

Las estrategias de resistencia a la sequía abarcan cualquier mecanismo que permite a la planta responder y adaptarse a condiciones de falta de agua

Aunque los términos evasión, escape, tolerancia y resistencia a la sequía suelen confundirse, cada uno tiene un significado específico y reflejan diferentes estrategias de las plantas para enfrentar el estrés hídrico.

Diferenciar correctamente estos conceptos es crucial, especialmente en un contexto donde el impacto de la sequía sobre la agricultura sigue aumentando.

CID BIO-SCIENCE te invita a descubrir las diferencias entre estas definiciones de uso frecuente.

Efectos del estrés por sequia

La sequía es el estresor más común que afecta a las plantas, siendo el principal reductor de la productividad de los cultivos.

La sequía es un periodo de nula o escasa precipitación que reduce el contenido de agua del suelo. Si esta situación se prolonga en el tiempo puede causar daños importantes a la planta. El estrés por sequía reduce la actividad fotosintética, el crecimiento, la reproducción de la planta y, en definitiva, la productividad del cultivo.

Las plantas han desarrollado mecanismos moleculares y fisiológicos para luchar contra la escasez de agua. Alguno de estos mecanismos puede ser la adaptación o la aclimatación:

- La adaptación es el resultado de la evolución de rasgos de desarrollo, morfológicos y fisiológicos de las plantas que les permiten tolerar mejor el estrés causado por la sequía. Dichos rasgos están determinados genéticamente.
- La aclimatación implica la plasticidad de la planta, que es capaz de ajustarse en función de las características de su estresor. Algunos cambios internos (bioquímicos, fisiológicos y estructurales) son los responsables de la aclimatación a las condiciones ambientales.

La respuesta de la planta a la sequía puede ser la adaptación, aclimatación o la combinación entre ambas. Si bien estos mecanismos permiten la resistencia a la sequía y sobrevivir, reducen sensiblemente el rendimiento y la productividad.

En definitiva, la resistencia agronómica se pierde. Por tanto, es importante comprender la respuesta de los mecanismos de resistencia a la sequía para desarrollar cultivos que sobrevivan a ella, pero manteniendo el rendimiento.

Resistencia a la sequía

La resistencia a la sequía incluye todas las respuestas y adaptaciones de la planta para sobrevivir y reproducirse durante y después de la deficiencia de agua.

Los mejoradores definen la resistencia a sequía como la "habilidad de los cultivos para mantener la productividad con pérdidas mínimas en un contexto de déficit hídrico".

Factores que determinan los mecanismos de resistencia de las plantas en respuesta al estrés:

- - Cuando las plantas experimentan menos estrés, los mecanismos pretenden hacer frente a las condiciones adversas mediante la evasión o escape de la sequía.
- - Cuando la sequía es severa, la tolerancia a la misma se usa para proteger a la planta frente al estrés.

La evasión y la tolerancia son las principales estrategias en contra de la sequía por parte de la planta.

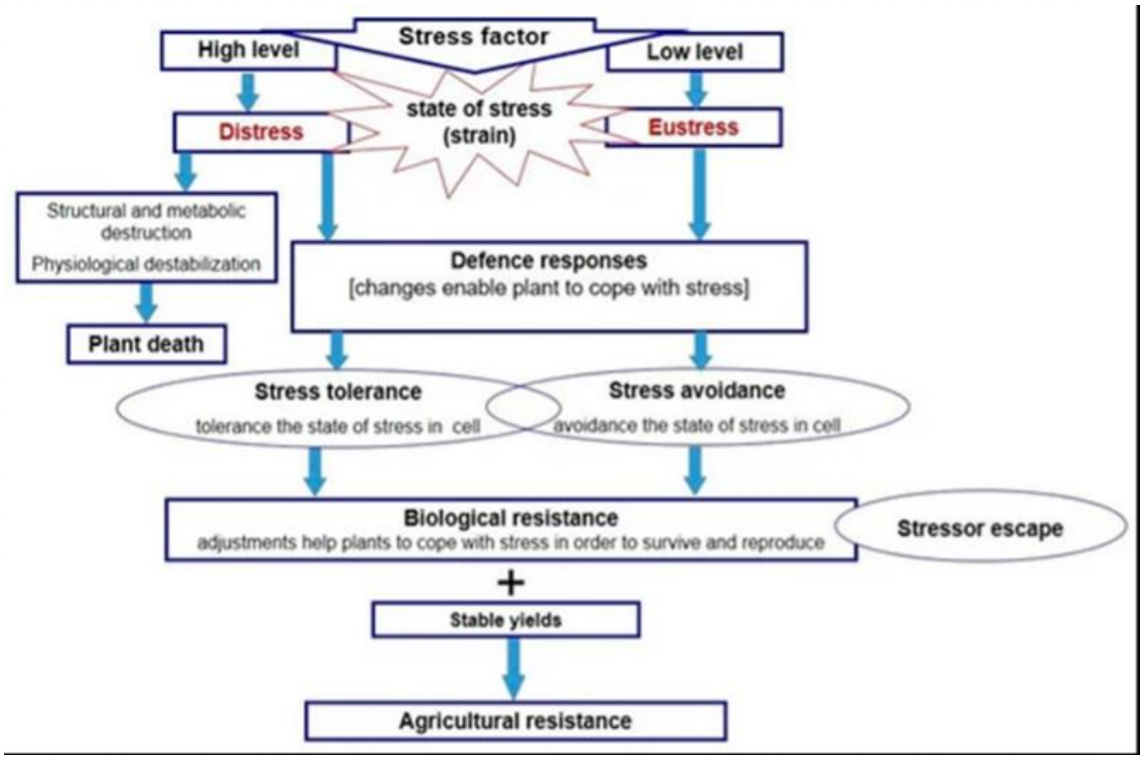


Figura 2. Mecanismos de recuperación frente a la sequía entran en juego tras el estrés

Escapar a la sequía

El escape a la sequía es el ajuste, natural o artificial, que previene encontrarse con la sequía. El ciclo de vida, periodo de crecimiento o el momento de la plantación garantizan que las plantas no experimenten alguna sequía esperada. Algunos ejemplos:

- Dormancia de semillas. Está regulada por el ácido abscísico (ABA) y giberelinas.
- Cuando los agricultores escogen cultivos con ciclos cortos que completan la producción antes de que suceda la sequía.

Las plantas sensibles de zonas semi áridas que experimentan sequías recurrentes utilizan esta estrategia.

Esta estrategia implica adaptación al medio en largo plazo. Es un proceso dependiente de la genética de la planta

Evitar la sequía

Se trata de la habilidad de las plantas para continuar sus procesos fisiológicos básicos durante la sequía. Las plantas ajustan su ritmo de crecimiento o su morfología para evitar los efectos adversos de la sequía.

Evitar la sequía implica el mantenimiento de los potenciales hídricos de la planta usando estrategias de aclimatación:

- Reducción de la pérdida de agua: Las plantas reducen la pérdida de agua mediante respuestas rápidas, tales como el cierre de estomas, enrollamiento de hojas y la acumulación de cera en la superficie de la hoja.
- Incremento de la capacidad de absorber agua al aumentar el envío de recursos a las raíces para que aumenten su desarrollo, aumentando la proporción raíces/brotes. Los cambios incluyen mayor profundidad y densidad de las raíces. Las plantas también mejoran su capacidad de almacenamiento de agua en sus células.
- Cambio en el ratio de crecimiento. Las plantas cambian su ciclo de vida acelerando o frenando el crecimiento vegetativo o reproductivo para evitar la pérdida completa de producción de semillas.

Estas estrategias pretenden evitar el estrés en las células vegetales debilitando los efectos de la sequía. Por ejemplo, el aumento de la conductancia estomática limita la pérdida de agua y los ajustes osmóticos para crecer en condiciones de escasez de agua.

La Evasion de la deshidratación solo es efectiva si la sequía es leve y de corta duración. No obstante, si estas condiciones continúan, se produce una inanición de carbono ya que la reducción de la conductancia estomática reduce el intercambio de gases y, por tanto, la tasa fotosintética.

El exceso de luz no usado desencadena la aparición de ROS y daña el fotosistema II (PSII), afectando aún más a la fijación de carbono.

La deshidratación celular es inevitable en bajo condiciones prolongadas de deficiencia hídrica, lo que hará que las plantas activen sus mecanismos de tolerancia a sequía.

Tolerancia a la sequía

Las plantas usan esta estrategia para reparar el daño causado por el estrés prolongado. La tolerancia es la habilidad de las plantas para continuar la actividad fisiológica, o al menos hasta cierto punto, bajo sequía severa.

La deshidratación celular causada por la sequía daña las membranas celulares, interrumpiendo los procesos fisiológicos. Los mecanismos de tolerancia implican la regulación de cientos de genes y de mecanismos metabólicos.

Reducir el daño producido conlleva dos estrategias:

- Mantenimiento de la integridad de membrana. Los mecanismos de tolerancia a la deshidratación mantienen la integridad de la membrana y la homeostasis celular aumentando las moléculas osmorreguladoras de la célula para mantener la presión de turgencia celular. Las vías metabólicas, algunas de las cuales controladas por el ácido abscísico (ABA), producen proteínas protectoras y compuestos necesarios para la protección de membranas y enzimas.
- Reducción de la acumulación de sustancias tóxicas: La deshidratación celular altera el proceso de respiración celular y reduce la fotosíntesis, generando ROS que crean estrés oxidativo. Ello conlleva la activación de sistemas de eliminación de ROS para reducir dicho estrés.

Estos mecanismos son enzimas como la catalasa (CAT), la superóxido dismutasa (SOD) y las peroxidasas (POX). En cambio, los sistemas no enzimáticos son el ácido ascórbico, los flavonoides, los carotenoides, el glutatión, la prolina, los compuestos fenólicos, etc.

La estabilidad de membrana se utiliza para indicar la tolerancia a sequía.

Cómo se recupera la planta de la sequía

La recuperación de la sequía es la capacidad de la planta para reanudar el crecimiento y la acumulación de biomasa tras la sequía, que ha causado deshidratación de las hojas, pérdida de superficie foliar y la pérdida de presión de turgencia.

El proceso de recuperación, iniciado en agricultura tras un riego o precipitación, consiste en invertir las respuestas de las plantas a la sequía. Las estrategias y el alcance de la recuperación dependen de la intensidad de la sequía, de su duración y de las especies. En caso de sequía grave y mortalidad de partes de la planta, la recuperación puede ser limitada, o bien no darse.

Algunos de los procesos de recuperación implicados son:

- Reapertura de estomas para restablecer la transpiración
- Crecimiento de nuevas partes de la planta como reemplazo de las partes muertas
- Incremento del ratio fotosintético
- Reducción de la peroxidación

La identificación de los mecanismos de recuperación es esencial para sugerir prácticas de gestión de los cultivos

Determinación de los mecanismos

Para estudiar la resistencia a la sequía, es crucial comprender sus distintas estrategias de resistencia

Los investigadores utilizan atributos individuales o comunes como indicadores, clasificados a grandes rasgos en: indicadores de evasión de la sequía, de la tolerancia e indicadores integrados.

Los atributos de evasión de la sequía están asociados con el mantenimiento de la humedad, la absorción de agua y su eficiencia de uso. Los investigadores necesitan sistemas de minirrizotrón como el CI-600 In-Situ Root Imager y el CI-602 Narrow Gauge Root Imager para medir el sistema radical y el CI-340 Handheld Photosynthesis System para medir la conductancia estomática.

Los indicadores de tolerancia a la sequía son principalmente parámetros fisiológicos como el ajuste osmótico y los cambios en el contenido de clorofila y enzimas. El Espectrómetro foliar CI-710s SpectraVue es ideal para medir el estrés en curso registrando los cambios en el contenido de clorofilas.

Además, los indicadores de sequía de interés para los cultivos pueden ser la tasa de supervivencia, el color, el peso seco, la tasa de cuajado de las semillas, etc.

La resistencia a la sequía en las plantas es compleja y puede combinar más de un mecanismo en sus distintos estadíos. Además, la sequía es impredecible y dinámica, por lo que resulta más difícil evaluar la resistencia a la sequía que a otros factores de estrés.

Fuentes

Bandurska, H. (2022). Drought stress responses: coping strategy and resistance. Plants, 11(7), 922.

Fang, Y., & Xiong, L. (2015). General mechanisms of drought response and their application in drought resistance

improvement in plants. Cellular and molecular life sciences, 72, 673-689.

Farooq, M., Wahid, A., Kobayashi, N. S. M. A., et al. (2009). Plant drought stress: effects, mechanisms and management. Sustainable agriculture, 153-188. DOI: 10.1051/agro:2008021

Ilyas, M., Nisar, M., Khan, N., et al. (2021). Drought tolerance strategies in plants: a mechanistic approach. Journal of Plant Growth Regulation, 40, 926-944.

Xu, Z., Zhou, G., & Shimizu, H. (2010). Plant responses to drought and rewatering. Plant Signaling & Behavior, 5(6), 649–654. https://doi.org/10.4161/psb.5.6.11398

Contacto

CID BIO-SCIENCE, INC.
NE 3rd Ave
98607 CAMAS, (WA) – ESTADOS UNIDOS
Tel.: (+1) 360.883.8835
sales@cid-inc.com
https://cid-inc.com/

2.3. Estrategias para mejorar el uso del agua. Riegos deficitarios

Mª Carmen Ruíz Sánchez[1] y Juan Gabriel Pérez Pérez[2]*

[1] *Departamento de Riego, Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS-CSIC)*
[2] *Grupo de Riegos, Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (CDAS-IVIA)*

* perez_juaperb@gva.es

Índice

1. Riegos deficitarios 124
1.1. Riego Deficitario Sostenido (RDS) 125
1.2. Riego Deficitario Controlado (RDC) 125
1.3. Riego Parcial de Raíces (RPR) 126
2. Bases para la elaboración de estrategias de riego deficitario controlado 127
2.1. Factores del suelo 127
2.2. Factores de la planta 128
2.3. Factores de la atmósfera 133
3. Respuesta fisiológica y agronómica al RDC de cultivos leñosos 134
3.1. Cítricos 134
3.2. Frutales de hueso 137

Resumen

De las diversas estrategias que pueden ser adoptadas para mejorar el uso del agua en la agricultura, en este capítulo nos centraremos en las que tienen que ver con el manejo de los riegos deficitarios. Estas estrategias son cruciales en áreas con recursos hídricos limitados o costos elevados. El empleo de riegos deficitarios implica aplicar menos agua de la necesaria para satisfacer completamente las necesidades del cultivo, lo que puede ofrecer beneficios productivos, económicos y medioambientales significativos.

En esta sección se introducen diferentes variantes como el Riego Deficitario Sostenido (RDS), el Riego Deficitario Controlado (RDC) y el Riego Parcial de Raíces (RPR). El éxito de estas estrategias depende de factores como el tipo de suelo, la variedad de cultivo y las condiciones climáticas. Para su correcto manejo es esencial comprender los aspectos agronómicos y fisiológicos de la planta, así como los periodos críticos del cultivo donde la falta de agua puede afectar negativamente la producción y calidad de la cosecha. Además, se incluyen ejemplos de aplicaciones de RDC en diversos cultivos leñosos, demostrando resultados en ahorro de agua, producción y calidad de la cosecha. También se destaca la importancia del monitoreo constante

del estado hídrico del suelo y la planta para controlar el nivel de déficit y corregir desviaciones, estableciendo valores umbrales de potencial hídrico que no deben superarse para evitar comprometer la producción y calidad del cultivo. En conclusión, el manejo de riegos deficitarios ofrece una alternativa viable para optimizar el uso del agua en la agricultura, siempre y cuando se implemente adecuadamente y se lleve a cabo un monitoreo continuo

1. Riegos deficitarios

El riego deficitario puede definirse como una estrategia en la que la cantidad de agua aplicada es inferior a la necesaria para satisfacer las necesidades hídricas del cultivo (ETc), es pues una práctica donde el riego, de una forma deliberada y sistemática, sólo repone una parte del agua perdida. Se aplica en regiones o momentos en los que la disponibilidad de agua para riego es limitada y/o los costes unitarios del agua son elevados. En estas condiciones la mejor programación del riego no es necesariamente la que conlleva un mayor rendimiento de los cultivos, ya que puede ser más rentable maximizar la productividad hídrica del cultivo que maximizar la cosecha por unidad de superficie.

Primero hay que señalar que cuando el suministro de agua no puede garantizarse o su disponibilidad in situ depende de factores externos aleatorios o impredecibles, como sequías o decisiones políticas tomadas a nivel local o nacional, el riego deficitario se denomina "no controlado". Pero cuando el suministro de agua es continuo porque el agua se almacena en estanques privados o en embalses colectivos, es posible aplicar una de las siguientes estrategias dependiendo de la forma en que se gestione el déficit hídrico: de forma fija durante todo el ciclo de cultivo, lo que se denomina riego deficitario sostenido (RDS), de forma diferente dependiendo del periodo fenológico en que se encuentre el cultivo, es el llamado riego deficitario controlado (RDC) o regando de forma alternativa solo un lado del árbol, el riego parcial de raíces (RPR).

Para cuantificar el nivel de déficit a aplicar, es necesario conocer primero las necesidades totales, según la 'receta' de los cálculos de la evapotranspiración del cultivo (ETc) o mediante la monitorización del estado hídrico del suelo-planta (ver capítulo 2.2.). El reto consiste en definir la estrategia óptima que minimice el impacto negativo del déficit previsto, conociendo que, aunque el rendimiento de los cultivos puede verse reducido en condiciones de riego deficitario, es el crecimiento vegetativo el más susceptible. Por ello, no es aconsejable aplicar ningún tipo de riego deficitario en las plantaciones jóvenes, donde el objetivo principal es maximizar el crecimiento para que los árboles alcancen su potencial vegetativo lo más rápidamente posible, por lo que en esta etapa hay que evitar incluso los déficits hídricos leves.

En cualquier caso, cuando se implementa de manera controlada y estratégica, el riego deficitario puede ofrecer una serie de ventajas significativas en los cultivos. Desde el punto de vista productivo, este método fomenta un desarrollo radicular más profundo y resistente, fortaleciendo la capacidad de las plantas para resistir condiciones adversas como la sequía. Además, al restringir el suministro de agua, se promueve una mayor concentración de nutrientes en el suelo, lo que puede mejorar la calidad de los cultivos. En términos económicos, el riego deficitario puede reducir los costes asociados con el uso de agua y energía, así como los gastos

de mantenimiento de los sistemas de riego. Por último, desde una perspectiva medioambiental, esta práctica contribuye a la conservación de los recursos hídricos al disminuir la extracción de agua de fuentes naturales, y puede ayudar a prevenir la salinización del suelo mediante la reducción del lavado de sales.

1.1. Riego Deficitario Sostenido (RDS)

El RDS es la forma más sencilla de manejar un riego deficitario, se basa en la distribución uniforme del déficit hídrico a lo largo de todo el ciclo del cultivo para evitar que se produzca un estrés hídrico severo. De esta forma, en cada riego se aplica un menor volumen de agua que el requerido según sus necesidades completas.

Hay que destacar que la mayor parte de la conversión de los riegos tradicionales por inundación en riegos presurizados (goteo, aspersión, etc.) en la zona del Levante español, ya se concibieron deficitarios, si bien la alta frecuencia y la localización de los aportes supuso una verdadera revolución que propició su indiscutible éxito y expansión. Por ello, inicialmente también se los denominó riegos deficitarios de alta frecuencia.

Las reducciones de agua aplicada provocan una disminución de la evapotranspiración del cultivo (ETc) y de las tasas de crecimiento de la planta al limitar su componente principal, la transpiración y, como consecuencia, la asimilación del carbono con el que fabricar sus carbohidratos. Es por lo que, cuando el objetivo principal sea maximizar el crecimiento hay que evitar incluso los déficits hídricos leves. En el apartado 2.2. se describen cuáles son los periodos del cultivo más susceptibles al déficit.

1.2. Riego Deficitario Controlado (RDC)

El RDC es una estrategia de manejo del riego que se desarrolló en la década de los 80 del siglo XX, por el equipo de Chalmers y colaboradores (Chalmers *et al.,* 1981). Inicialmente fue concebida como una estrategia de riego en melocotonero para reducir el crecimiento vegetativo excesivo, y que, de forma secundaria, supuso un ahorro de agua de riego y mejora en la calidad de la fruta.

El RDC consiste en la aplicación de reducciones del riego en determinados momentos del ciclo del cultivo “no críticos” en los que las respuestas, fundamentalmente, de rendimiento y calidad del fruto se vean mínimamente afectadas por el déficit hídrico. Al finalizar estos periodos de restricción, se reestablece la dosis de riego óptima para cubrir plenamente las necesidades durante los denominados "periodos críticos", que son aquellas fases o etapas fenológicas del cultivo más sensibles al déficit hídrico. Esto supone incorporar en los criterios de programación del riego la fenología de la planta.

Para el diseño de estrategias de RDC se requiere, por tanto, conocer previamente los periodos en los que un cultivo es más sensible al déficit (periodos críticos), los cuales difieren de un cultivo a otro, en función del comportamiento agronómico y fisiológico de cada uno. Además de la cuidadosa selección del momento de aplicación, es importante considerar la intensidad y duración de la aplicación del déficit, que a su vez también dependen de la fase de desarrollo de la planta.

El RDC intenta aprovechar el efecto positivo del déficit hídrico, ya que cuando se aplica durante periodos de activo crecimiento vegetativo da lugar a árboles más pequeños (menor coste de

poda), sin afectar la producción de fruta. Otro concepto básico del RDC es el de asegurar que, tras el periodo de déficit hídrico, la reanudación del riego al 100 % de las necesidades del cultivo es completa y coincide con el inicio del periodo crítico.

El éxito del RDC reside en aunar conocimientos agronómicos: adecuado diseño de la instalación de riego, caudal de goteros, etc., con los fisiológicos: fenología del cultivo, periodos más sensibles al déficit hídrico, mecanismos que se desarrollan para afrontar el déficit, etc. Y todo ello gracias al control que permiten los riegos localizados.

1.3. Riego Parcial de Raíces (RPR)

El riego parcial de raíces es una estrategia de riego que surge a finales de los años 90 en Australia, como alternativa al RDC, para el control del vigor mejorar la eficiencia en el uso del agua del viñedo (Dry *et al* 2000). Esta técnica de riego fue desarrollada sobre la base del conocimiento de los mecanismos fisiológicos que controlan la transpiración, y para ello es necesario establecer condiciones heterogéneas de humedad en el suelo (Stoll *et al* 2000). Esto implica regar solo la mitad de la zona radicular en cada evento de riego, dejando que la otra mitad de la zona radicular se seque hasta alcanzar cierto contenido de humedad en el suelo antes de volver a humedecerla mediante el cambio de riego al lado seco (Figura 1).

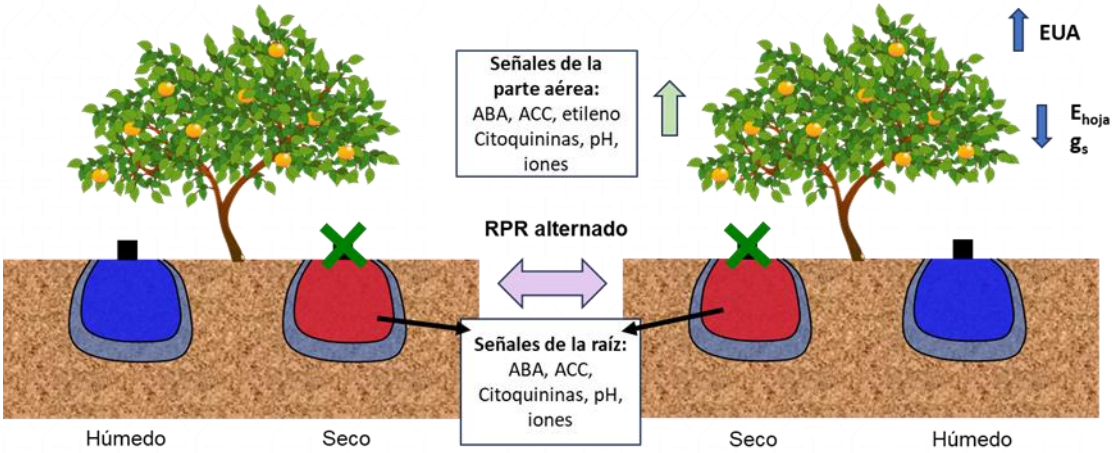


Figura 1. Esquema de los procesos que ocurren en el suelo y la planta al aplicar riego parcial de raíces (RPR)

Los enfoques prácticos del RPR se basan en un mecanismo de señalización de origen radicular e incluyen los siguientes tipos: RPR fijo y alterno. En el RPR fijo, una mitad del sistema radicular se riega durante toda la temporada de crecimiento, mientras que la otra mitad se expone a la sequedad del suelo durante todo el período de crecimiento. En el PRD alterno, se cambian las partes del sistema radicular que se riegan y se secan. Durante estos ciclos de alternado del riego se pretende evitar que las raíces del lado seco se sequen en exceso y al mismo tiempo permitir una producción y transporte continuo de las señales radiculares a la parte aérea. La frecuencia del cambio de los lados de la zona radicular irrigada y parcialmente seca también depende de las características del suelo y otros factores ambientales (lluvia y temperatura). El potencial hídrico del suelo se suele aplicar como indicador para cambiar el lado de riego en el sistema RPR. Sin embargo, el enfoque de modelado también podría ser utilizado para la programación del riego.

El diseño de estrategias de RPR se puede realizar con una perspectiva “estática”, donde se aplica una cantidad reducida de agua constante durante todo el período de crecimiento, o bien, de forma "dinámica" cuando las cantidades de agua regadas cambian según la fase fenológica específica del cultivo. Además, el RPR puede aplicarse mediante diferentes métodos de riego en campo (líneas de goteo, surcos, microaspersores, etc.) dependiendo de la especie de cultivo, la textura del suelo o las variables climáticas.

El RPR ha sido aplicado con éxito en una gran cantidad de cultivos y en diferentes sistemas de producción. Varios estudios de campo con RPR demostraron que el principal beneficio del riego RPR es el uso reducido de agua para riego. La base del éxito de esta estrategia debe tener en cuenta varios factores, incluyendo: la interacción entre cultivos, la combinación variedad-injerto, el tipo y características del suelo, la práctica agrícola, condiciones agroclimáticas específicas, etc.

2. Bases para la elaboración de estrategias de riego deficitario controlado

Para elaborar una estrategia de RDC y que ésta tenga éxito, deben considerarse previamente diversos factores. Los aspectos agronómicos ya se han mencionado en el capítulo 4. A continuación se describen los que tienen relación directa con la planta, con su comportamiento fisiológico en el marco hidrodinámico del continuo suelo-planta-atmósfera, que gobierna el flujo del agua desde que ésta se aplica al suelo hasta que se pierde a la atmósfera a través de los estomas en el proceso de transpiración (Figura 2).

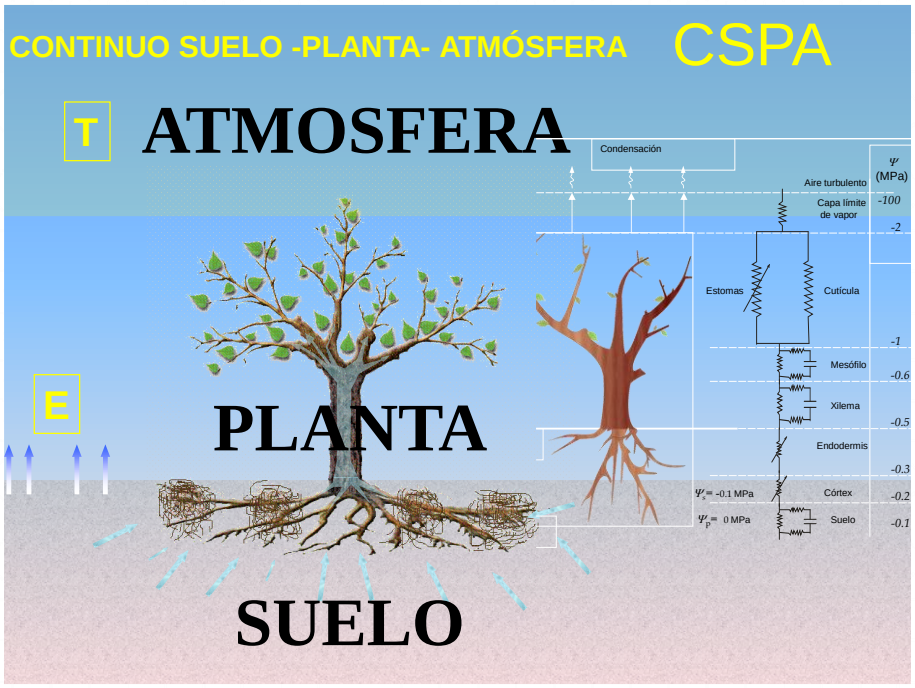


Figura 2. Esquema del flujo del agua en el continuo suelo-planta-atmósfera. E: evaporación, T: transpiración

2.1. Factores del suelo

El RDC requiere manejar los déficits de riego con precisión, de forma que se facilite tanto la aparición de situaciones de déficit hídrico en la planta como la recuperación de éstas de una

forma rápida y precisa. Es por esta razón por la que se recomiendan los suelos poco profundos y con una baja capacidad de retención hídrica.

De la misma forma, es más idóneo contar con volúmenes reducidos de suelo humectado que favorezca obtener sistemas radicales más concentrados, lo que facilita el agotamiento y recarga de agua en el perfil del suelo de forma rápida. Por ello, las estrategias de RDC son idóneas con sistemas de riego localizado.

Estas dos premisas constituyeron el éxito de los primeros estudios de RDC en los que se observó que cuando se ralentiza o se limita el crecimiento vegetativo de los árboles frutales por efecto del déficit hídrico aplicado se favorece la canalización de los carbohidratos hacia los frutos que resultan beneficiados para su crecimiento.

En las situaciones en que los suelos tienen una textura pesada, son más arcillosos y con una alta capacidad de retención hídrica o por el contrario son arenosos, los inicios y fin de los periodos de déficit y los de recuperación se adaptarán, de forma que la aparición del déficit y la disponibilidad del riego completo coincidan con los momentos en los que la planta los necesita, según los que previamente se han definido de acuerdo con su calendario fenológico. En el primer caso donde la imposición del déficit sería más lenta, la reducción del riego debería ser más brusca o se debería adelantar el inicio del periodo de reducción del riego y el de salida del mismo.

Igualmente, cuando no se dispone de sistemas presurizados de riego, se han citado buenos resultados con RDC en el riego por surcos, manejando las aplicaciones de forma muy frecuente y a bajas dosis, de forma que se humedezca solo una parte del sistema radical. También se pueden alternar las aplicaciones de agua en los surcos situados a ambos lados de los árboles lo que permite mejorar la eficiencia del riego, a semejanza de lo que se indica para el riego parcial de raíces (RPR).

2.2. Factores de la planta

Períodos críticos

Se denominan periodos críticos aquellas fases o momentos fenológicos de la planta en los que el desarrollo de un déficit hídrico puede condicionar de forma negativa la producción y/o la calidad de la cosecha, en el caso de los frutales, o la producción de biomasa en el de especies forestales. Conocer el ciclo fenológico del cultivo (Figura 3) es el principal factor en el que reside el éxito de la aplicación de estrategias de RDC.

Si bien sería necesario contar con datos para las distintas variedades, portainjertos empleados y condiciones edafoclimáticas en las que se desarrolla el cultivo, se dispone de información bibliográfica que permitiría asumir, en términos generales, cuales son dichos periodos períodos. No obstante, lo ideal sería verificar a escala local la sensibilidad de cada fase fenológica del cultivo con ensayos de respuesta al déficit hídrico.

En cítricos se señalan dos periodos críticos el primero abarca los procesos de floración y cuajado del fruto, en el que un déficit hídrico severo condicionaría el número total de frutos en la recolección (Figura 4). El segundo se corresponde con la fase de crecimiento del fruto, más concretamente la de activo crecimiento o fase II de la curva sigmoidal, en la que se producen los cambios más importantes en las características morfológicas, anatómicas y fisiológicas, y en la que los déficits hídricos afectan fundamentalmente al tamaño final de los frutos. La fase I de

división celular y la de fase III de maduración, de crecimiento lento, serían fases no críticas desde el punto de vista del déficit hídrico.

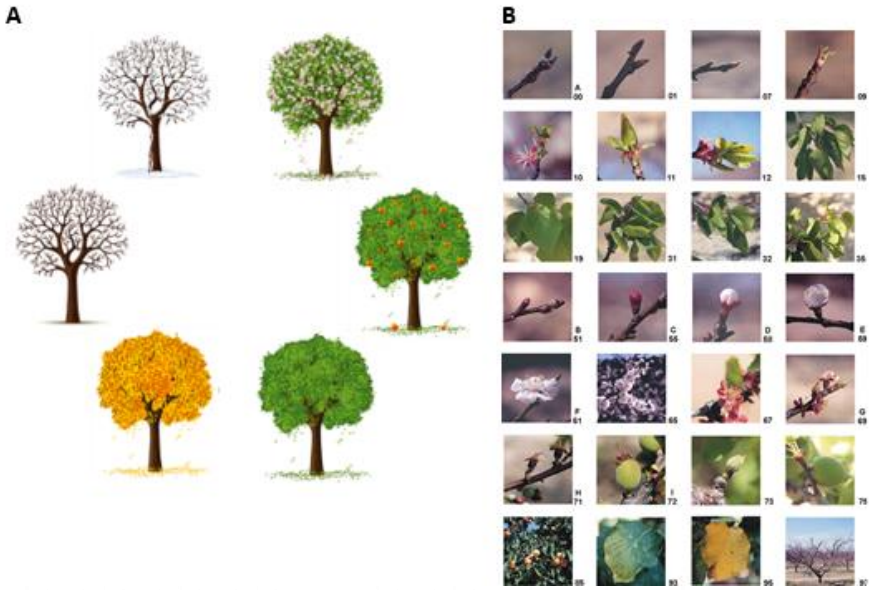


Figura 3. (A) Ciclo fenológico de los frutales. (B) Principales fases de fenológicas de melocotoneros, según código BBCH (Lancashire et al., 1989) (números) y estados florales (Bagiollini, 1980) (letras).

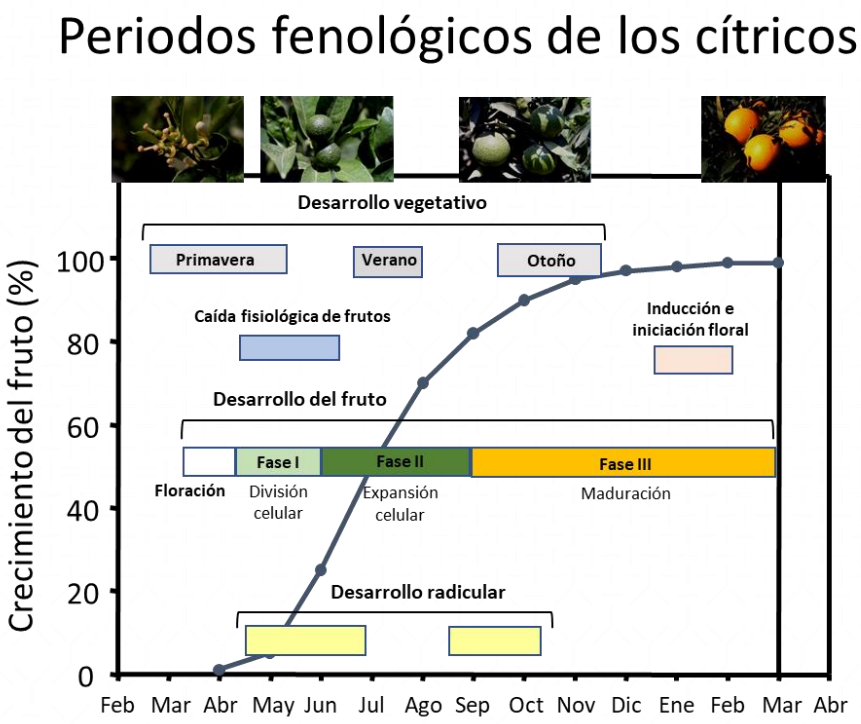


Figura 4. Esquema general de los periodos fenológicos de los cítricos

Los frutales de hueso tienen un crecimiento del fruto en forma de doble sigmoide con tres fases: fase I de división celular que incluye un primer periodo de crecimiento rápido del fruto (endocarpio), fase II de crecimiento exterior lento que coincide con el endurecimiento del hueso, ambas de baja sensibilidad al déficit hídrico en el caso de la primera por coincidir con época de baja demanda evaporativa de la atmosfera y por lo tanto bajos requerimientos hídricos y en la segunda por ser la acumulación de materia seca un proceso menos sensible al déficit (Figura 5).

La fase III se corresponde al segundo periodo de rápido crecimiento, básicamente debido a un engrosamiento de las células del mesocarpio y es la más sensible y, por lo tanto, crítica al déficit hídrico por su efecto en el peso y tamaño final limitando pues la cosecha.

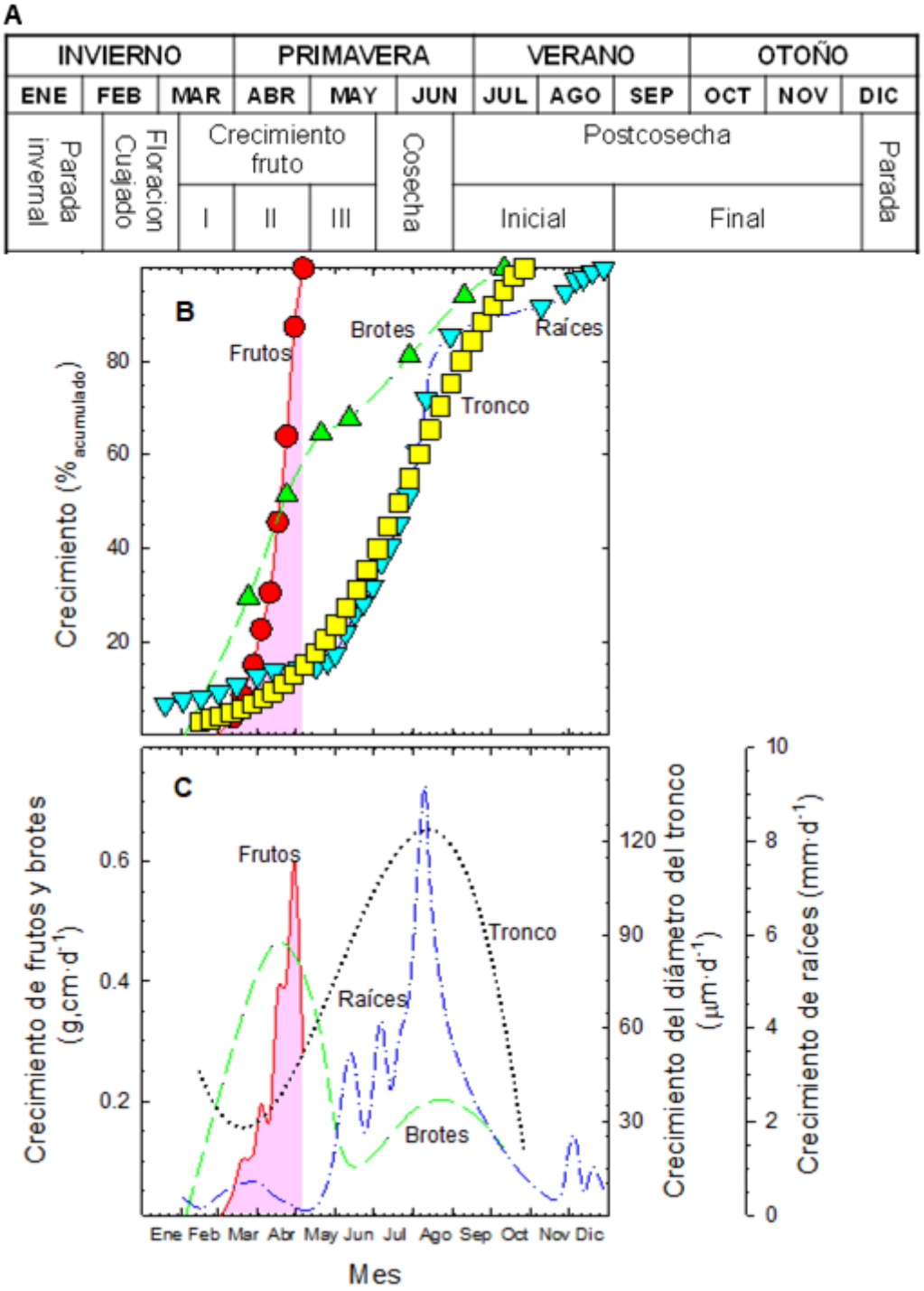


Figura 5. (A) Esquema general de los periodos fenológicos de Prunus sp. (B) Evolución (en porcentaje del crecimiento anual) del peso de fruto (●), longitud de brotes (▲), diámetro de tronco (□) y longitud de raíces (▼) de melocotoneros tempranos, (C) velocidad de crecimiento diario de los mismos

Mención aparte merece la fase de poscosecha en la que el árbol frutal se dedica a realizar la fotosíntesis que permitirá la acumulación de reservas para el año siguiente, y donde se produce

un crecimiento vegetativo secundario, pero lo más importante a nivel fisiológico es que durante esta fase se produce la diferenciación de las yemas florales para la próxima cosecha. Este periodo es mucho más largo en las variedades de maduración temprana que las medias y tardías, por lo que se delimitan dos fases, la poscosecha inicial y la final, siendo la fase inicial (1,5-2 meses después de la recolección) la fase crítica donde los efectos del déficit en la diferenciación floral afectan a la calidad y viabilidad del polen de la siguiente floración.

En ciruela para consumo en seco, se señala como fase crítica de alta sensibilidad al déficit hídrico el periodo de endurecimiento del hueso, cuando la acumulación de materia seca puede estar comprometida si los déficits son severos.

En almendro todas las fases de crecimiento vegetativo son sensibles al déficit, por lo que éste debe reducirse al mínimo. Por el contrario, el crecimiento en longitud de la almendra exteriormente (pellejo y cáscara) y la fase de endurecimiento de la cáscara no son muy críticas. Sin embargo, se consideran fases críticas las del crecimiento y acumulación de materia seca del embrión (la almendra comestible) (inicio del verano, a mitad del mes de junio, hasta cosecha) cuando se ha de asegurar condiciones óptimas de riego, ya que además coincide con la diferenciación floral de las yemas que darán lugar a la siguiente cosecha.

Para la determinación con precisión del inicio y fin de estas fases críticas del fruto se han propuesto diversos parámetros, como son el incremento en diámetro (de fácil determinación con el uso de calibres digitales) o la evaluación de la velocidad de crecimiento. En cítricos la identificación precisa del inicio de la fase II de rápido crecimiento puede ser determinada utilizando datos de velocidad de crecimiento relativa (VCR):

$$VCR = (D_2 - D_1)/D_1 \cdot (t_2 - t_1)$$

Siendo D: diámetro; t: tiempo; y 1, 2: dos medidas consecutivas. El inicio de esta fase crítica en cítricos coincide con un incremento acusado de la velocidad de crecimiento relativa.

En frutales la identificación de la fase III viene dada por los cambios en la acumulación de peso seco, aumentando la velocidad de crecimiento de peso seco en las fases I y III mientras que disminuye en la fase II. Por ello, el porcentaje de materia seca respecto al peso fresco del fruto es un buen indicador del cambio de fase, iniciándose la fase crítica cuando la curva de materia seca disminuye.

Crecimiento vegetativo y del fruto

Los objetivos del RDC fueron, en sus inicios, evitar el exceso de vigor de los árboles frutales, por ello las fases de brotación y desarrollo de los ramos son fases no críticas del cultivo donde la aplicación del déficit hídrico reduciría el crecimiento vegetativo. Es por ello que los cultivos más idóneos para una aplicación exitosa de estrategias de RDC son aquellos que tienen una clara **separación entre los procesos de crecimiento vegetativo y del fruto**. De esta forma, los déficits hídricos que se aplican sólo inciden en un proceso sin afectar al otro.

Es el caso de los cítricos donde la fase crítica de crecimiento de los frutos se inicia cuando ya se ha completa el 80-90 % del crecimiento anual de los ramos. Por ejemplo, el crecimiento de los ramos de limonero se realiza en dos periodos, uno durante la segunda mitad de marzo y otro durante la primera mitad de junio, separados ambos por un periodo de estabilización que

coincide con los procesos de floración y cuajado. La fase II de activo crecimiento del limón (fase crítica) se inicia cuando el 90 % del crecimiento de los ramos ha tenido lugar.

En frutales, el crecimiento vegetativo tiene lugar después del reposo invernal, a expensas de los carbohidratos almacenados el año anterior. Durante los tres primeros meses del ciclo de cultivo se produce el crecimiento de los brotes terminales y laterales dando lugar a la rápida expansión de la copa de los árboles. En variedades de maduración temprana se observa otra fase de crecimiento vegetativo activo después de la cosecha. En general, el crecimiento de los ramos o brotes coincide con las fases iniciales de crecimiento de los frutos (I y II) que no resultan críticas al déficit y que en el caso de variedades tardías sólo supone un 2-5 % de su volumen total. En caso de coincidencia en el tiempo entre ambos procesos, hay que recordar que el crecimiento vegetativo es más sensible que el del fruto ante situaciones de déficit hídrico.

Otro aspecto positivo del RDC es el hecho de que los frutos son capaces de realizar un crecimiento compensatorio, al reanudar el riego tras el periodo de déficit, que les permite obtener frutos de tamaños similares a los de árboles regados al 100 % durante todo el ciclo. Este hecho, constatado en cítricos y frutales, es debido a que durante los periodos de déficit la capacidad de acumulación de materia seca en el fruto se mantiene incluso a niveles superiores. Dicha materia seca está disponible y al restablecer el suministro hídrico se produce un aumento en la velocidad de crecimiento del fruto mayor que la de frutos crecidos sin déficit hídrico.

Mecanismos de resistencia/tolerancia al déficit

Las plantas realizan modificaciones o desarrollan mecanismos para paliar los efectos negativos ante un determinado déficit, en este caso, los déficits hídricos cuando se reduce deliberadamente el riego, y que provocan distintas respuestas que les permiten bien adaptarse, tolerar o resistir estas situaciones adversas. Por lo que, conocer estos mecanismos de resistencia ayudará a explicar el grado de sensibilidad al déficit de cada cultivo y en cada fase fenológica. Para ello se muestran los principales indicadores del estado hídrico de la planta.

La respuesta primaria ante el déficit hídrico en el suelo, común a los cítricos y frutales, es la **disminución del potencial hídrico foliar y de tallo** (una disminución de la energía con que el agua es retenida en los tejidos). Esta disminución del potencial hídrico se traduce en una **disminución de la apertura de los estomas**. Recordemos que los estomas son el lugar por donde se pierde agua en forma de vapor, lo que, además, permite la refrigeración de la hoja, y también a través de ellos entra el CO_2 con el que se fabrican los carbohidratos. Se evalúa con la medida de la conductancia estomática (pérdida de H_2O) y el nivel de fotosíntesis (entrada de CO_2). La disminución de la conductancia estomática es un mecanismo con el cual las plantas evitan de alguna manera el déficit hídrico, al limitar las pérdidas de agua por transpiración. Por el contrario, se disminuye la capacidad de enfriamiento, lo que provoca un **aumento de la temperatura de las hojas.**

Hay que tener en cuenta que estos indicadores también responden a situaciones de déficit hídrico ambiental y a los ciclos diurnos de luz/oscuridad. Por ello el potencial hídrico es más negativo a mediodía solar que durante la noche, y más negativo en verano que en invierno-primavera-otoño, o sea en los momentos en que la atmósfera es más demandante de agua. La conductancia foliar igualmente responde a factores externos como la intensidad lumínica (los estomas se abren en respuesta a la luz) y el gradiente de humedad de la hoja al aire, así como a

factores intrínsecos como la edad de la hoja (con tasas altas en hojas jóvenes y bajas al aumentar la ontogenia), o las hormonas, como el ácido abscísico, cuyo aumento en la hoja provoca el cierre estomático.

En los cítricos hay que añadir a estos mecanismos de evitación la disminución de la superficie foliar evaporante por medio del **enrollamiento** de las hojas y la defoliación, ésta en caso de déficits hídricos muy severos. Como mecanismo de tolerancia al déficit hídrico, los cítricos desarrollan un **ajuste elástico**, que consiste en un aumento de la elasticidad de las paredes celulares con objeto de facilitar el mantenimiento de la turgencia y facilitando así la continuidad de los procesos de crecimiento, si bien éste se desarrolla sólo ante situaciones de déficits severos.

En frutales, junto a la regulación estomática ante déficits hídricos moderados se desarrollan mecanismos de evitación basados en la disminución del área foliar como la **epinastia** (movimientos de las hojas por cambios en el ángulo de inserción foliar con el tallo) con lo que se consigue reducir las pérdidas de agua por transpiración.

Además, la regulación estomática se traduce en una mayor disminución de la conductancia estomática que de la fotosíntesis, lo que favorece el mantenimiento de la productividad de los frutales en respuesta a déficits moderados. Este hecho se ha constatado en frutales sometidos a distintos modos de aplicación de déficit (distintas dosis y frecuencia), y ha permitido concluir que, ante situaciones de riego deficitario, es más favorable mantener una **alta frecuencia de aportes con dosis reducidas** que aumentar los intervalos entre riegos.

Ante déficits severos los frutales desarrollan mecanismos de tolerancia basados en el **ajuste osmótico**, proceso por el que se acumulan de forma activa solutos en las células, lo que permite mantener la turgencia foliar, evita una deshidratación y previene la abscisión foliar. Hay que señalar que, el ajuste osmótico depende de la velocidad de imposición y desarrollo e intensidad del déficit, es transitorio y finito y no mantiene plenamente todos los procesos fisiológicos y morfológicos de la planta.

Es común a frutales y cítricos que la reanudación del riego completo, tras un periodo de déficit hídrico, provoca una **recuperación** muy rápida (horas) del potencial hídrico en las hojas, pero no en el grado de apertura de los estomas, observándose una recuperación de la conductancia estomática más lenta (días), lo que constituye un mecanismo de adaptación que permite controlar las pérdidas de agua y recuperar la turgencia celular de una forma más eficiente.

2.3. Factores de la atmósfera

Las condiciones medioambientales no pueden ser manipuladas (más allá del uso de mallas de sombreo, orientación de las filas, etc.), pero es importante conocerlas ya son las que limitan y condicionan el establecimiento de un cultivo.

Las variedades de maduración temprana con bajas necesidades de frío tienen un ciclo de cultivo con unas fases de crecimiento del fruto más cortas que las de maduración tardía, por lo que la delimitación de las fases críticas es más difícil y a menudo se solapan en el tiempo, debiendo adaptarlas a los requisitos de las distintas variedades en los distintos ambientes.

Por otro lado, como se ha indicado anteriormente, la aplicación de estrategias de RDC es idónea en zonas áridas y semi-áridas con escasez de recursos hídricos, alta demanda evaporativa de la

atmósfera y escasa pluviometría. El RDC requiere que se produzcan situaciones de déficit hídrico en el suelo y la planta, a fin de aprovechar los efectos positivos de éste. Por ello, cuando las fases no críticas del cultivo (momento en que se reducen los aportes hídricos) coincidan con periodos de baja demanda hídrica y/o se produzcan lluvias abundantes durante dichos periodos, se puede suprimir el riego de forma total hasta alcanzar el nivel de déficit hídrico requerido.

3. Respuesta fisiológica y agronómica al RDC de cultivos leñosos

El RDC se aplica en situaciones en las que la disponibilidad de agua para riego es insuficiente, por ello, y aunque no hay una receta única de RDC, como regla general se sugiere completar las necesidades durante los periodos críticos del cultivo y distribuir la diferencia durante el resto del ciclo, evitando que se promuevan déficits hídricos muy severos que condicionen la viabilidad del cultivo.

No hay que confundir las necesidades de agua con las necesidades de riego, ya que el agua puede ser muy importante durante determinadas fases fenológicas, pero no por ello necesitar riego, ya que la demanda evaporativa de la atmósfera es muy baja y/o el suelo dispone de ella en cantidad suficiente para abastecer las necesidades de la planta.

Se describen a continuación algunos ejemplos de la aplicación de distintas estrategias de RDC y los resultados obtenidos en términos de ahorro de agua, producción y calidad de la cosecha, siempre comparados con respecto a un tratamiento en el que se aplica el total de las necesidades hídricas (100 % de la ETc) durante todo el ciclo de cultivo, a menudo definido como 'árboles bien regados' o con riego completo. Se corresponden con ensayos realizados en los cultivos más representativos del área y que pueden servir de guía mostrando las distintas casuísticas que se pueden presentar. No obstante, en la bibliografía incluida al final del capítulo se pueden consultar y ampliar la información de éstos y otros estudios sobre riego deficitario.

En todos los casos resulta imprescindible contar con una guía o parámetro relativo al estado hídrico del suelo (contenido volumétrico de agua mejor que potencial hídrico o matricial) y de la planta (potencial hídrico de tallo mejor que foliar o algún otro indicador que permita el monitoreo en continuo). Todo ello para controlar el nivel de déficit y corregir las desviaciones que pudieran producirse, así como establecer valores umbrales o niveles límites de déficit que no se debieran superar. En este sentido se indicarán valores de potenciales hídricos en planta que sean frontera entre lo permisible y perjudicial para el cultivo en términos de comprometer la producción y/o calidad de la cosecha.

3.1. Cítricos

En general, los **cítricos** tienen unas necesidades hídricas elevadas (entre 4,000 y 6,500 m^3/ha), siendo también exigentes en términos de calidad del agua. Se considera un cultivo sensible a la sequía, aunque están adaptados para crecer en condiciones de infradotación hídrica. La baja disponibilidad de agua en el suelo conlleva varias alteraciones fisiológicas, como la deshidratación pasiva de las hojas, que resulta en una reducción del potencial de turgencia y del contenido relativo de agua (Pérez-Pérez *et al.*, 2007), pero principalmente desarrollan mecanismos de evitación basados en el cierre estomático, lo que reduce las tasas fotosintéticas, representando en esta especie el principal mecanismo de conservación de agua para mantener

la turgencia foliar (Sánchez-Blanco *et al.,* 1990; Pérez-Pérez *et al*., 2009a). No desarrollan mecanismos de tolerancia al estrés basados en la osmorregulación activa de la hoja (mediante la acumulación de solutos orgánicos e inorgánicos), aunque si mecanismos elásticos para mantener la turgencia foliar (Ruiz-Sánchez *et al*., 1997; Savé *et al.,* 1995). Además, la recuperación gradual de la apertura estomática, después de volver a regar plantas previamente estresadas, puede considerarse como un mecanismo para promover la hidratación de las hojas (Pérez-Pérez *et al*., 2008a).

La mayor parte de los estudios de RDS realizados en cítricos indican que aportaciones de agua entre el 60-80 % de la ETc durante todo el ciclo del cultivo, provocan reducciones en la producción de entre un 5 y un 10 %, con un mismo número de frutos por árbol (lo que implica una disminución del tamaño unitario), si bien con mayores niveles de calidad organoléptica (Castel y Buj, 1990).

La respuesta de los cítricos al riego deficitario controlado depende principalmente de la etapa fenológica y la severidad del déficit hídrico aplicado. Cuando se aplica estrés hídrico durante la floración y las etapas iniciales del crecimiento del fruto (Pérez-Pérez *et al*., 2008b; García-Tejero *et al*., 2010), se produce una reducción notable en el rendimiento final de frutos. Durante la fase de crecimiento rápido del fruto (fase II), el impacto del estrés hídrico influye drásticamente tanto en el tamaño como en la calidad de los frutos en mandarina (Navarro *et al*., 2010), naranjo (García-Tejero *et al.,* 2010) y pomelo (Pérez-Pérez *et al.* 2014). Es importante destacar que el estrés hídrico durante la maduración puede alterar las características organolépticas de los cítricos, aumentando los sólidos solubles totales y la acidez sin efectos perjudiciales en el rendimiento (Pérez-Pérez *et al.,* 2009b).

Existen diferencias sustanciales en la respuesta al déficit hídrico entre portainjertos, variedades y otros factores como la calidad del agua. En relación al primer factor, Romero *et al*. (2006) en clementina 'Clemenules' y Pérez-Pérez *et al*. (2008a) en naranjo 'Lane late', indican que un sistema de raíces tipo 'Carrizo' (caracterizado por una alta conductividad hidráulica de las raíces y raíces más fibrosas restringidas en un pequeño volumen de suelo) puede ser un buen portainjerto para árboles cultivados en condiciones de riego no limitantes, ya que mostraron un mejor estado hídrico de la planta, lo que indujo un mayor vigor y rendimiento. Sin embargo, un sistema radicular tipo 'Cleopatra' (más profundo y densamente ramificado) podría ser una buena opción por su tolerancia moderada al estrés hídrico, al mantener un mejor estado hídrico de la planta y mayor intercambio gaseoso durante los períodos de déficit hídrico.

En limonero 'Verna' se demostró que las diferencias en el vigor del portainjerto influyen en la respuesta del cultivo al riego deficitario (Robles *et al*., 2017). Estos autores recomendaron el uso de portainjertos vigorosos como *Citrus macrophylla* bajo condiciones de riego óptimas (100 %), ya que un portainjerto vigoroso induce un mejor estado hídrico de la planta y un mayor intercambio gaseoso (especialmente en verano), suponiendo un mayor desarrollo vegetativo y rendimiento. Sin embargo, bajo condiciones de riego deficitario, la respuesta de este portainjerto fue fuertemente influenciada por su excesivo vigor, manifestando una mayor sensibilidad al estrés hídrico impuesto, sufriendo una reducción drástica del crecimiento vegetativo y el rendimiento, en ambos casos proporcional a la disminución en la aplicación de agua de riego.

En clementina 'Clemenules', la respuesta a largo plazo de una estrategia basada en la aplicación de riego deficitario (50 % ETc) desde mediados de julio a mediados de septiembre (fase II del crecimiento del fruto), provocó un estrés hídrico moderado durante parte de la fase II, manteniendo valores de potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) entre -1.3 y -1.5 MPa, permitiendo un ahorro de agua del 15 %, reduciendo el crecimiento vegetativo (20 %) sin perjudicar la capacidad de rendimiento y mejorando la calidad de la fruta (Ballester *et al*., 2014). Sin embargo, la aplicación de la misma estrategia de RDC en naranja cv. 'Navelina' mostró una respuesta diferente, con ahorros de agua de hasta el 19 % sin reducción en el rendimiento, pero sí en el peso final del fruto, poniendo en riesgo el retorno económico del cultivo (Ballester *et al.,* 2013).

En limón temprano 'Fino', el RDC con reducción de aportes hídricos al 25 % de la ETc durante todo el año y riego completo durante la fase II de crecimiento del fruto (periodo que coincide con el verano de climas mediterráneos) resultó una interesante alternativa, ya que permitió ahorros de agua del 30 % sin reducción en la producción total ni en los primeros cortes donde el precio del limón es más alto (Domingo *et al.,* 1996). En este cultivo se pudo comprobar que la reducción del riego (70 % ETc) durante el periodo crítico de crecimiento del limón no es recomendable desde el punto de vista económico, ya que se produce un retraso en conseguir el tamaño comercial del fruto, disminuyendo su cotización dado su carácter temprano. No obstante, se postula como una estrategia de riego a aplicar en condiciones de extrema sequía durante el periodo estival, ya que la producción total fue similar a la de árboles con riego completo durante todo el año (Domingo y Ruiz-Sánchez, 1995).

En el caso de limón tardío 'Verna' sobre naranjo amargo, la respuesta al RDC con restricciones de agua de riego (25 % ETc) durante las fases I y III del crecimiento del fruto, provocó un estrés hídrico severo ($\Psi t_{allo} \approx$ -2.0 MPa), pero permitió lograr ahorros de agua del 28 % sin impacto negativo en el rendimiento, y además tuvo un impacto positivo al mantener el tamaño comercial del fruto durante un período más largo (Robles *et al.,* 2017).

Otro aspecto importante por considerar es la calidad del agua a la hora de aplicar estrategias de RDC. El uso continuado de aguas con elevada salinidad combinado con la aplicación de restricciones en la dosis de riego favorece la acumulación de sales en el suelo, y consecuentemente en la planta, pudiendo generar problemas de toxicidad. En este sentido destacan los estudios llevados a cabo en los últimos 10 años por el CEBAS-CSIC con el riego con aguas regeneradas con elevada salinidad. En mandarina 'Clemenules' regada con agua regenerada salina (≈ 3.4 dS m^{-1}), la aplicación de RDC durante la fase II de crecimiento de fruto (50 % ETc), alcanzó ahorros de agua del 15 %, pero incrementó la acumulación de sales en el suelo y la acumulación de iones tóxicos en la planta como el Na^+, Cl^- y B (Pedrero *et al*. 2014). A nivel productivo, la combinación de agua regenerada salina y RDC afectó ligeramente al rendimiento debido a un descenso en la carga de frutos. En la misma línea de estudios, pero en pomelo 'Star Ruby', la aplicación de RDC (50 % ETc) durante la fase II utilizando agua regenerada salina (≈ 3.4 dS m^{-1}), permitió ahorros de agua del 13 %, pero redujo ligeramente la carga de frutos (Pedrero *et al.* 2015).

Para asegurar el éxito de las estrategias de RDC combinadas con el riego con aguas con elevada salinidad, es fundamental implementar medidas precisas de gestión del riego y llevar a cabo un monitoreo continuo. Esto ayudará a evitar la salinización del suelo y la consecuente degradación de sus propiedades físicas.

3.2. Frutales de hueso

El **melocotonero** es quizá el frutal en el que más estudiado su respuesta agro-fisiológica a diferentes condiciones de riego deficitario, desde los iniciales del grupo de Mitchell y Chalmers en Australia, donde quedó claro que reducciones del riego antes de la fase crítica de segundo crecimiento rápido del fruto supuso ahorros de agua del 34 % sin mermas en la producción ni en el tamaño del melocotón, siempre que se asegure el riego al 100 % al inicio de esa fase crítica de rápido crecimiento del melocotón (Mitchell y Chalmers, 1982; Chalmers *et al*., 1981).

Al otro lado del mundo, aunque en condiciones también de clima mediterráneo se han obtenido distintos resultados dependiendo de la variedad, el tipo de suelo y el destino de la fruta (fresco o conserva). De un lado ensayos en suelos pesados y profundos de California, donde una estrategia de RDC con reducción del riego al 25 % de la ETc durante las fases I y II de crecimiento del fruto y la poscosecha, y el 100-130 % durante la fase crítica (fase III fruto) supuso un ahorro del 40 % del agua en una variedad de maduración tardía y hasta el 70% en otra temprana, frente a los 1.200 mm/año aplicados al tratamiento regado al 100 % ETc todo el año, obteniendo unas producciones totales y número de frutos por árbol similares en ambos casos. No obstante, en el tratamiento de RDC se obtuvo un menor número de frutos de calibre extra, equilibrado por un mayor número de frutos pequeños, y dado que los frutos extra se cotizaron el doble que los pequeños, la rentabilidad de esta estrategia quedó limitada y no se compensó por el importante ahorro de agua de riego en esas condiciones. Este hecho se debió a la baja capacidad de infiltración del suelo, que impidió la recarga del perfil a tiempo para recuperar el estado hídrico óptimo en los árboles al inicio de la fase crítica (Ruiz-Sánchez y Girona, 1995).

En melocotoneros de maduración media y tardía en Cataluña se aplicó RDC con riego al 35 % de la ETc durante la fase II que permitió un ahorro de agua de hasta el 22-35 % sin afectar al rendimiento ni al tamaño final del melocotón (Girona *et al*., 2003). Sin embargo, en Murcia un riego al 25 % ETc durante las etapas I y II de crecimiento del fruto y la poscosecha en un cultivar de maduración temprana causó una reducción en el rendimiento del fruto (Abrisqueta *et al.,* 2010). Este hecho se debe al largo periodo poscosecha (importante, recordemos, para la acumulación de reservas y la diferenciación floral) en las variedades de maduración temprana, por lo que los déficits hídricos deben gestionarse cuidadosamente en este momento para evitar reducciones en la floración y en la carga de frutos en la siguiente cosecha. Es de destacar que en estas condiciones de clima mediterráneo se obtuvo una función de producción lineal, entre los 200 y 700 mm de riego, obteniendo el tratamiento de RDC el mayor ahorro de agua de riego.

Estudios sobre RDS (riego al 50 % de la ETc durante todo el ciclo de cultivo) revelaron una disminución en el rendimiento como resultado de un menor número de frutos por árbol, mientras que el tamaño del fruto se mantuvo relativamente sin cambios, según datos de un cultivar de melocotón de maduración temprana (Vera *et al*., 2013) y en nectarina (Naor *et al*., 2005). Igualmente, el RPR en melocotonero, con riego al 50 % de la ETc aplicado solo la mitad del sistema radical del árbol, dio lugar a resultados similares con reducción de los rendimientos en variedades tempranas (Abrisqueta *et al.,* 2010) y tardías (Goldhamer *et al*., 2002), por lo que no presenta ninguna ventaja frente a otras estrategias de riego deficitario (RDS o RDC).

La mayoría de los estudios, como ya hemos comentado, indican la mayor sensibilidad al déficit hídrico de los procesos de crecimiento vegetativo que los del fruto. Es por ello que las menores producciones obtenidas en los distintos ensayos de reducción del riego en melocotonero, tanto

en variedades tempranas (Ruiz-Sánchez *et al.,* 2018; Vera *et al.,* 2013) como de media estación (Marsal *et al.,* 2016), vienen mediadas por los menores tamaños de copa de los árboles en estas condiciones que dan lugar a menos puntos para la fructificación, pero por contraparte conllevan una reducción en los costes relacionados con la poda (Ruiz-Sánchez *et al.,* 2010).

Mención aparte merece la consideración de los efectos del déficit hídrico en la calidad del melocotón o la nectarina (de la misma especie), coincidiendo todos los estudios en que el riego deficitario da lugar a frutos en cosecha con mayor firmeza y contenido de sólidos solubles, con un color rojizo más intenso y un aumento en el contenido fenólico, el dulzor, la jugosidad y la intensidad del sabor, en comparación con los melocotones bien regados, tanto los de maduración temprana como tardía. Por contra el contenido en vitamina C y carotenoides se redujo en frutos de árboles con RDC (Alcobendas *et al*., 2012; Tavarini *et al*., 2011; Vallverdu *et al*., 2012; López *et al*., 2016; Conesa *et al*., 2021a). Incluso durante el almacenamiento en frio se ha encontrado una menor pérdida de peso en estos frutos, probablemente debido a la formación de una cutícula más gruesa como resultado del estrés hídrico al que se expusieron los árboles durante el periodo de riego deficitario (Falagán *et al.,* 2015; Conesa *et al.,* 2021b).

En cuanto a los valores de potencial hídrico de tallo (Ψ_{tallo}) que pueden ayudar a manejar los niveles de déficits en planta, éstos se pueden resumir en que los valores mínimos que la planta puede soportar sin penalizar el rendimiento son de -0,5 a -0,7 MPa durante el periodo de crecimiento del fruto, y de -1,5 MPa para el periodo de poscosecha para garantizar que no se perjudicará la floración (De la Rosa *et al.,* 2015; Girona y Fereres, 2012), o de -2,0 MPa para limitar la aparición de frutos dobles (Naor *et al*., 2005). No obstante, cabe indicar que siempre que sea posible Ψ_{tallo} debe mantenerse por encima de -0,9 MPa, valor indicador de inicio de estrés hídrico en melocotonero (Abrisqueta *et al*., 2012).

Por último, señalar que tanto en melocotonero como en todos los frutales donde la carga de frutos (número de frutos por árbol) es un factor que determina el tamaño final del fruto, los programas de RDC han de adaptarse teniendo en cuenta este factor (Abrisqueta *et al*., 2017). Si la carga es muy alta, sería aconsejable reducirla con un aclareo fuerte para conseguir el tamaño del fruto que proporcione el mayor beneficio al agricultor. Si la carga es baja, el RDC puede reducir la producción total, pero aumentar el tamaño del fruto por encima del riego completo, especialmente en variedades tempranas (Mirás-Avalos *et al*., 2013).

El albaricoquero tiene un ciclo fenológico similar al melocotonero con una clara separación en el tiempo entre los procesos de crecimiento de los ramos y del fruto, por lo que los déficits afectarían a uno solo de los procesos. Los periodos críticos se centran a la segunda fase de rápido crecimiento del fruto (fase III) y la poscosecha inicial (aproximadamente un mes después de finalizar la recolección). La fase II de endurecimiento del hueso es muy corta, por lo que los déficits hay que manejarlos con cuidado y en cualquier caso asegurar que el 100 % del riego está disponible para alimentar a los frutos en su fase siguiente, observándose un crecimiento compensatorio de los mismos, hecho éste en el que se basa el éxito de la estrategia de RDC. En variedades tempranas como la 'Búlida', cultivada en la Región de Murcia, el RDS, con aplicación de déficits fijos al 50 % ETc durante todo el ciclo del cultivo, supuso una disminución de la rentabilidad y el vigor de la plantación al reducir la producción en un nivel similar a la reducción del riego. Esta variedad resultó ser sensible a los déficits hídricos severos incluso durante las fases no críticas, ya que una estrategia de RDC con riego al 25-40 % en los periodos no críticos

se tradujo en ahorros de agua superiores al 30 %, pero implicaron una importante reducción de la producción. Por el contrario, RDC con déficits moderados en dichos periodos (riego al 40-60 % ETc) supuso ahorros del orden del 20 % con un mantenimiento de la productividad y calidad de la fruta a niveles óptimos, siempre que se asegure el riego para completar las necesidades hídricas durante los periodos críticos (Pérez-Pastor *et al.,* 2009, 2014).

A la mejora en la calidad organoléptica de los albaricoques en condiciones de déficit hídrico moderado (mayor contenido en sólidos solubles o acidez) hay que añadir la menor incidencia de ataques fúngicos y de pérdida de peso durante el almacenamiento en frío, lo que contribuye a garantizar un correcto transporte (Pérez-Pastor *et al*., 2007; Pérez-Sarmiento *et al.,* 2010) o la menor incidencia del 'quemado' (pitburn) al mejorar las concentraciones de calcio (Bussi y Plenet, 2013).

Los niveles de déficit hídrico en planta, definidos con valores de potencial hídrico foliar, medido al alba, que no deben superarse para no arriesgar o limitar de forma importante la producción final, serían de hasta -0,5 MPa durante las tres fases de crecimiento del fruto, -0,7 MPa para la poscosecha inicial y de -1,3 MPa para el periodo de poscosecha final (Pérez-Pastor *et al*., 2016; Xiloyanis y Dichio, 2012).

El almendro es una especie frutal que se adapta a una amplia gama de disponibilidades hídricas y condiciones edafoclimáticas, desde los suelos profundos y fértiles de California (USA) donde se aplican importantes cantidades de agua de riego (1.100 mm/año) hasta los secanos áridos y suelos pobres del litoral mediterráneo donde apenas los aportes de agua de lluvia conducen a una productividad de 1/10 frente al regadío, en donde los requerimientos rondan los 650 mm/año (Girona, 1992). A pesar de las distintas respuestas obtenidas, cualquier estrategia de riego deficitario mejora la productividad del agua frente al riego completo.

Hay que tener en cuenta que las primeras etapas del crecimiento del fruto coinciden con la mayor parte del crecimiento vegetativo, con lo que la competencia por los carbohidratos da lugar a una alternancia en el patrón de fructificación, especialmente en condiciones de secano (Goldhamer y Girona, 2012).

La aplicación de reducciones fijas del riego (RDS) en almendros jóvenes supuso una alternativa muy exitosa en términos productivos frente a las condiciones de secano mediterráneo, con aplicaciones de agua entre los 200 y 600 mm/año, lo que abarcaba desde lo que suponen los riegos de auxilio hasta el nivel en el que es más rentable el cultivo de otro frutal (Del Amor *et al*., 1987). No obstante, una reducción lineal de riego al 60 % de la ETc durante todo el ciclo produjo reducciones muy importantes de la producción (Hutmacher *et al.,* 1994).

La producción es relativamente insensible cuando se aplican déficits hídricos de suaves a moderados durante el periodo de llenado del grano, ya que el fruto actúa como un fuerte sumidero para los fotoasimilados comparado con otros órganos de la planta. Así, los mejores resultados de la aplicación de RDC se han obtenido con reducción del riego al 20 % ETc desde mitad de junio hasta la cosecha, donde no se observaron reducciones importantes en el peso de la pepita ni en la carga de frutos en la variedad 'Non Pareil' en California (Stewart *et al.,* 2011). En las condiciones de Cataluña, almendros 'Ferragnes' mostraron una respuesta positiva, ya que si bien se observó una reducción ligera de la producción total (que fue de media de unos 1.500 kg de grano/ha), la eficiencia productiva del agua fue el doble de la de árboles regados al 100 %

durante todo el año, pues los ahorros de agua fueron de hasta el 60 % (Girona y Marsal, 1995). Esta misma estrategia en la variedad 'Cartagenera' provocó un ahorro similar de agua con una reducción en la producción del 11 % (Romero *et al.,* 2004), mientras que en la variedad 'Marta' la aplicación de un RDC, con riego al 50 % ETc durante el periodo de llenado del grano, permitió en un ahorro de agua del 50 %, con un rendimiento de frutos que quintuplicó los valores del secano (Egea *et al.,* 2010), observándose, en un ensayo a largo plazo, que el peso de la pepita se redujo por efecto de dichos déficits solo en los años de mayor producción (años ON) debido a la mayor competición y al efecto acumulado del déficit (Egea *et al.,* 2013).

En variedades de almendra de cáscara blanda, que necesitan un riego importante durante la fase de aumento de peso de la semilla, se han ensayado estrategias de RDC (con reducciones de riego entre el 40 y 60 % de la ETc durante las distintas fases de crecimiento del fruto) obteniendo producciones similares a las de árboles regados al 100 % de la ETc durante todo el ciclo y con ahorros de agua del 58 % (Goldhamer *et al.,* 2006).

Los niveles de déficit hídricos en planta indican no superar valores de potencial hídrico al alba de -1,7 MPa (Girona *et al.,* 2005) o -2,0 MPa (Romero *et al.,* 2004) durante el verano para que no se disminuya el peso seco de la pepita.

Agradecimientos

Los autores agradecen la financiación recibida en los proyectos del Ministerio de Ciencia (AMB95-0071, HID99-0951, AGL2002-04048-C03-03, AGL2006-12914-C02-01, AGL2009-06981, AGL2010-14861, RTA2012-00102-00-00, AGL2013-49047-C2-2-R, AGL2016-77282-C3-1-R, PID2019–106226RB-C2, PID2019-104893RR-I00, PID2023-147690OB-I00); además del proyecto europeo PRIMA "HANDYWATER", a través del programa nacional "Proyectos de Colaboración Internacional" (PCI2021-121940) financiado por MCIN/AEI/10.13039/5011000110033 y por la Unión Europea NextGenerationEU/PRTR, y del programa AGROALNEXT (PRTR–C17.I1) con fondos NextGenerationEU y de la Fundación Séneca de la Región de Murcia.

Bibliografía

Abrisqueta I., Tapia L.M., Conejero W., Sánchez-Toribio M.I., Abrisqueta J.M., Vera J., Ruiz-Sánchez M.C. (2010). Response of early-maturing peach [Prunus persica (L.)] trees to deficit irrigation. Spanish Journal of Agricultural Research, 8 (S2), 30-39.

Abrisqueta I., Vera J., Tapia L.M., Abrisqueta J.M., Ruiz-Sánchez M.C. (2012). Soil water content criteria for peach trees water stress detection during the postharvest period. Agricultural Water Management, 104, 62-67.

Abrisqueta, I., López-Martínez, L., Conejero, W., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C. (2017). Root and aerial growth in early-maturing peach trees under two crop load treatments. Spanish Journal of Agricultural Research, 15 (2), 31-35.

Alcobendas R., Mirás-Avalos J.M., Alarcón J.J., Pedrero F., Nicolás E. (2012). Combined effects of irrigation, crop load and fruit position on size, color and firmness of fruits in extra-early cultivar of peach. Scientia Horticulturae, 142, 128-135.

Bagiollini, M. (1980). Stades repères du cerisier - Stades repères du prunier. Stades repères de l'abricotier. Stades repères du pêcher. ACTA. Guide Pratique de Défense des Cultures, Paris.

Ballester C., Castel J., Intrigliolo D.S., Castel J.R. (2013). Response of Navel Lane late citrus trees to regulated deficit irrigation: yield components and fruit composition. Irrigation Science, 31, 333-341.

Ballester C., Castel J., Abd El-Mageed T.A., Castel J.R., Intrigliolo D.S. (2014). Long-term response of 'Clementina de Nules' citrus trees to summer regulated deficit irrigation. Agricultural Water Management, 138, 78-84.

Bussi C., Plenet D. (2013). Effect of three different irrigation regimes on young apricot (Prunus armeniaca L. Batsch) trees. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 88, 519-524.

Castel J.R., Buj A. (1990). Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. Irrigation Science, 11, 121-127.

Chalmers D.J., Mitchell P.D., Van Heek L. (1981). Control of peach tree growth and productivity by regulated water supply, tree density and summer pruning. Journal of the American Society for Horticultural Science, 106, 307-312.

Conesa M.R., Conejero W., Vera J., Ruiz-Sánchez M.C. (2021a). Soil-based automated irrigation for a nectarine orchard in two water availability scenarios. Irrigation Science, 39, 1-19.

Conesa M.R., Conejero W., Vera J., Agulló V., García-Viguera C., Ruiz-Sánchez M.C. (2021b). Irrigation management practices in nectarine fruit quality at harvest and after cold storage. Agricultural Water Management, 243, 106519.

De la Rosa J.M., Domingo R., Gómez-Montiel J., Pérez-Pastor A. (2015). Implementing deficit irrigation scheduling through plant water stress indicators in early nectarine trees. Agricultural Water Management, 152, 207-216.

Del Amor F., Torrecillas A., Ruiz-Sánchez M.C., Gómez J. (1987). Respuesta del almendro al riego de alta frecuencia. Fruticultura Profesional, 11, 77-82.

Domingo R., Ruiz-Sánchez M.C. (1995). Respuesta de los cítricos al riego deficitario. Limonero. En: Riego Deficitario Controlado. Mundi Prensa, Murcia, 119-171.

Domingo R., Ruiz-Sánchez M.C., Sánchez-Blanco M.J., Torrecillas A. (1996). Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. Irrigation Science, 16, 115-123.

Dry P., Loveys B., Düring H. (2000). Partial drying of the rootzone of grape. I. Transient changes in shoot growth and gas exchange. Vitis, 39(1), 3-7.

Egea G., Nortes P.A., González-Real M.M., Baille A., Domingo R. (2010). Agronomic response and water productivity of almond trees under contrasted deficit irrigation regimes. Agricultural Water Management, 97, 171-181.

Egea G., Nortes P.A., Domingo R., Baille A., Pérez-Pastor A., González-Real M.M. (2013). Almond agronomic response to long-term deficit irrigation applied since orchard establishment. Irrigation Science, 31, 445-454.

Falagán N., Artés F., Artés-Hernández F., Gómez P.A., Pérez-Pastor A., Aguayo E. (2015). Comparative study on postharvest perfomance of nectarines grown under regulated deficit irrigation. Postharvest Biology and Technology, 110, 24-32.

García-Tejero I., Romero-Vicente R., Jiménez-Bocanegra J.A., Martínez-García G., Durán-Zuazo V.H., Muriel-Fernández J.L. (2010). Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation on yield, fruit quality, and water productivity. Agricultural Water Management, 97(5), 689-699.

Girona J. (1992). Estrategias de riego deficitario en el cultivo del almendro. Fruticultura Profesional, 47, 38-45.

Girona J., Marsal, J. (1995). Estrategias de RDC en almendro. En: Riego Deficitario Controlado. Mundi Prensa, Murcia, 97-118.

Girona, J., Mata, M., Arbonés, A., Alegre, S., Rufat, J., Marsal, J. (2003). Peach tree response to single and combined regulated deficit irrigation regimes under shallow soils. Journal of the American Society for Horticultural Science, 128, 432-440.

Girona J, Mata M, Marsal J. (2005). Regulated deficit irrigation during the kernel-filling period and optimal irrigation rates in almond. Agricultural Water Management, 75, 152-167.

Girona J., Fereres E. (2012). Peach. En: Crop Yield Response to Water. (Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Raes D., Eds.), FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, Rome, 266-280.

Goldhamer D.A., Salinas M., Crisosto C., Day K.R., Soler M., Moriana A. (2002). Effects of regulated deficit irrigation and partial root zone drying on late harvest peach tree performance. Acta Horticulturae, 592, 343-350.

Goldhamer D.A., Viveros M., Salinas M. (2006). Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. Irrigation Science, 24(2), 101-114.

Goldhamer D.A., Girona J. (2012). Almond. En: Crop Yield Response to Water. (Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Raes D., Eds.), FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, Rome, 358-373.

Hutmacher R.B., Nightingale H.I., Rolston D.E., Biggar J.W., Dale F., Vail S.S., Peters D. (1994). Growth and yield responses of almond (Prunus amygdalus) to trickle irrigation. Irrigation Science, 14, 117-126.

Lancashire P.D., Bleiholder H., van den Boom T., Langeluddeke P., Stauss R., Weber E., Witzenberger A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. Annals of Applied Biology, 119, 561-601.

López G., Echeverría G., Bellvert J., Mata M., Behboudian M.H., Girona J., Marsal J. (2016). Water stress for a short period before harvest in nectarine: Yield, fruit composition, sensory quality, and consumer acceptance of fruit. Scientia Horticulturae, 211, 1-7.

Marsal J., Casadesus J., López G., Mata M., Bellbert J., Girona, J. (2016). Sustainability of regulated deficit irrigation in a mid-maturing peach cultivar. Irrigation Science, 34, 201-208.

Mirás-Avalos J.M., Alcobendas R., Alarcón J.J., Pedrero F., Valsesia P., Lescourret F., Nicolás E. (2013). Combined effects of water stress and fruit thinning on fruit and vegetative growth of a very early-maturing peach cultivar: assessment by means of a fruit tree model, QualiTree. Irrigation Science, 31, 1039-1051.

Mitchell P.D., Chalmers D.J. (1982). The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. Journal of the American Society for Horticultural Science, 107, 853-856.

Naor A., Stern R., Peres M., Greenblat Y., Gal Y., Flaishman M.A. (2005). Timing and severity of postharvest water stress affect following year productivity and fruit quality of field-grown 'Snow Queen' nectarine. Journal of the American Society for Horticultural Science, 130, 806-812.

Navarro J.M., Pérez-Pérez J.G., Romero P., Botía P. (2010). Analysis of the changes in quality in mandarin fruit, produced by deficit irrigation treatments. Food Chemistry, 119, 1591-1596.

Pedrero F., Maestre-Valero J.F., Mounzer O., Alarcón J.J., Nicolás E. (2014). Physiological and agronomic mandarin trees performance under saline reclaimed water combined with regulated deficit irrigation. Agricultural Water Management, 146, 228-237.

Pedrero F., Maestre-Valero J.F., Mounzer O., Nortes P.A., Alcobendas R., Romero-Trigueros C., Bayona J.M., Alarcón J.J., Nicolás E. (2015). Response of young 'Star Ruby' grapefruit trees to regulated deficit irrigation with saline reclaimed water. Agricultural Water Management, 158, 51-60.

Pérez-Pastor A., Ruiz-Sánchez M.C., Martínez J.A., Nortes P.A., Artés F., Domingo R. (2007). Effect of deficit irrigation on apricot fruit quality at harvest and during storage. Journal of the Science of Food and Agriculture, 87, 2409-2415.

Pérez-Pastor A., Domingo R., Torrecillas A., Ruiz-Sánchez M.C. (2009). Response of apricot trees to deficit irrigation strategies. Irrigation Science, 27, 231-242.

Pérez-Pastor A., Ruiz-Sánchez M.C., Domingo R. (2014). Effects of timing and intensity of deficit irrigation on vegetative and fruit growth of apricot trees. Agricultural Water Management, 134, 110-118.

Pérez-Pastor A., Ruiz-Sánchez M.C., Conesa M.R. (2016). Drought stress effect on woody tree yield. En: Water Stress and Crop Plants: A Sustainable Approach. (Ahmad P., Ed.), John Wiley & Sons Ltd., UK, 356-374.

Pérez-Pérez J.G., Syvertsen J.P., Botía P., García-Sánchez F. (2007). Leaf water relations and net gas Exchange responses of salinized Carrizo citrange seedlings during drought stress and recovery. Annals of Botany, 100, 335-345.

Pérez-Pérez J.G., Romero P., Navarro J.M., Botía P. (2008a). Response of sweet orange cv 'Lane late' to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. Irrigation Science, 26, 415-425.

Pérez-Pérez J.G., Romero P., Navarro J.M., Botía P. (2008b). Response of sweet orange cv 'Lane late' to deficit irrigation in two rootstocks. II: Flowering, fruit growth, yield and fruit quality. Irrigation Science, 26, 519-529.

Pérez-Pérez J.G., Robles J.M., Tovar J.C., Botía P. (2009a). Response to drought and salt stress of lemon 'Fino 49' under field conditions: water relations, osmotic adjustment and gas exchange. Scientia Horticulturae, 122, 83-90.

Pérez-Pérez J.G., Robles J.M., Tovar J.C., Botía P. (2009b). Response to drought and salt stress of lemon 'Fino 49' under field conditions: water relations, osmotic adjustment and gas exchange. Scientia Horticulturae, 122, 83-90.

Pérez-Pérez J.G., Robles J.M., Botía P. (2014). Effects of deficit irrigation in different fruit growth stages on 'Star Ruby' grapefruit trees in semi-arid conditions. Agricultural Water Management, 133, 44-54.

Pérez-Sarmiento F., Alcobendas R., Mounzer O., Alarcón J.J., Nicolás E. (2010). Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. Spanish Journal of Agricultural Research, 8(2), 86-94.

Robles J.M., Botía P., Pérez-Pérez J.G. (2017). Sour orange rootstock increases water productivity in deficit irrigated 'Verna' lemon trees compared with Citrus macrophylla. Agricultural Water Management, 186, 98-107.

Romero P., Botía P., García F. (2004). Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on vegetative development and yield of mature almond trees. Plant and Soil, 260, 169-181.

Romero P., Navarro J.M., Pérez-Pérez J.G., García-Sánchez F., Gómez-Gómez A., Porras I., Martínez V., Botía P. (2006). Deficit irrigation and rootstock: their effects on water relations, vegetative development, yield, fruit quality and mineral nutrition of Clemenules mandarin. Tree Physiology, 26, 1537-1548.

Ruiz-Sánchez M.C., Girona J. (1995). Investigaciones sobre riego deficitario controlado en melocotonero. En: Riego Deficitario Controlado. Mundi Prensa, Murcia, 67-95.

Ruiz-Sánchez M.C., Domingo R., Savé R., Biel C., Torrecillas A. (1997). Effects of water stress and rewatering on leaf water relations of lemon plants. Biologia Plantarum, 39, 623-631.

Ruiz-Sánchez M.C., Domingo R., Castel J.R. (2010). Review. Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain. Spanish Journal of Agricultural Research, 8 (S2), 5-20.

Ruiz-Sánchez M.C., Abrisqueta I., Conejero W., Vera J. (2018). Deficit irrigation management in early-maturing peach crop. En: Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment: Tools, Strategies and Challenges for Woody Crops. (García-Tejero I., Durán V.H., Eds.), Academic Press-Elsevier, CA, USA, 111-129.

Sánchez-Blanco M.J., Torrecillas A., Del Amor F., León A. (1990). The water relations of Verna lemon trees from flowering to the end of rapid fruit growth. Biologia Plantarum, 32, 357-363.

Savé R., Biel C., Domingo R., Ruiz-Sánchez M.C., Torrecillas A. (1995). Some physiological and morphological characteristics of citrus plants for drought resistance. Plant Science, 110(2), 167-172.

Stewart W., Fulton A., Krueger W.H., Lampinen B.D., Shackel K.A. (2011). Regulated deficit irrigation reduces water use of almonds without affecting yield. California Agriculture, 65(2), 90-95.

Stoll M., Loveys B., Dry P. (2000). Hormonal changes induced by partial rootzone drying of irrigated grapevine. Journal of Experimental Botany, 51(350), 1627-1634.

Tavarini S., Gil M.I., Tomás-Barberán F., Buendia B., Remorini D., Massai R., Degl'Innocenti E., Guidi L. (2011). Effects of water stress and rootstocks on fruit phenolic composition and physical/chemical quality in Suncrest peach. Annals of Applied Biology, 158, 226-233.

Vallverdu X., Girona J., Echeverria G., Marsal J., Behboudian M.H., Lopez G. (2012). Sensory quality and consumer acceptance of "Tardibelle" peach are improved by deficit irrigation applied during stage II of fruit development. HortScience, 47, 656-659.

Vera J., Abrisqueta I., Abrisqueta J.M., Ruiz-Sánchez M.C. (2013). Effect of deficit irrigation on early-maturing peach tree performance. Irrigation Science, 31, 747-757.

Xiloyanis C., Dichio B. (2012). Apricot. En: Crop Yield Response to Water (Steduto P., Hsiao T.C., Fereres E., Raes D., Eds.), FAO Irrigation and Drainage Paper No. 66, Rome, 432-439

Toro Tempus® Air, riego de precisión sin límites

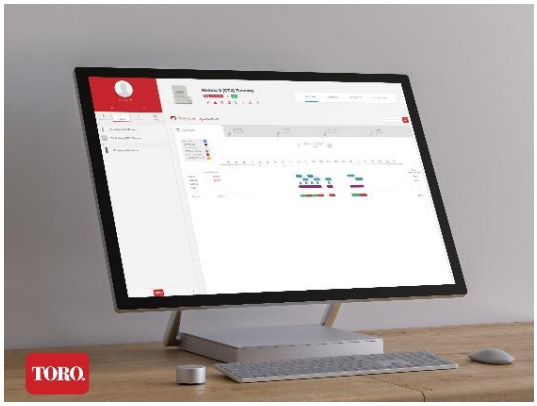
TORO presenta **Tempus® Air, el sistema de control centralizado** que permite automatizar sistemas de riego y monitorizar numerosos parámetros ambientales a través de sensores de precisión.

Hasta hoy, automatizar su sistema de riego significaba enfrentarse **a inversiones desafiantes en términos de costes**, mano de obra y eficiencia. La complejidad de la operación y los numerosos obstáculos técnicos desalientan a muchos agricultores.

¡Ahora ese ya no es el caso!

El sistema centralizado Tempus® Air de Toro, empresa especializada en soluciones para **riego de precisión**, ofrece una solución completa y confiable, caracterizada por una alta flexibilidad de uso para **diferentes niveles de inversión**.

Tempus® Air se compone de varios módulos que se pueden añadir en cualquier momento, para dar seguimiento tanto a las necesidades iniciales del sistema de riego como a las posteriores modificaciones y ampliaciones de las zonas a regar. **Gracias a la modularidad y flexibilidad** de nuestra solución, hemos podido crear con éxito numerosos sistemas de automatización, satisfaciendo las más diversas necesidades.



Sistema plug & play

Al conectarse a una red celular de **banda ancha (3G o 4G)** o a una **red Wi-Fi**, los gateways siempre son accesibles de forma remota a través de **un smartphone, una tablet o un PC**. Los gateways, a su vez, se comunican vía radio con los módulos de campo a través de la **tecnología LoRa™** enviando y recibiendo comandos manuales, **programas de riego y lecturas de sensores de campo.**

Cada gateway individual puede controlar hasta **30 módulos** (CT MV, MS, PS). También existe la **posibilidad de crear grupos de gateways y de módulos** pudiendo gestionar varios sistemas de riego como fuera una única unidad de control con infinitas estaciones y áreas potencialmente ilimitadas.

¡No más cables, no más límites!

Las unidades de control y los módulos de sensores - **protección IP68** - se alimentan con **pilas de 9V** y utilizan la **tecnología LoRa™**, a bajo consumo de energía, que permite cubrir una superficie de **más de 200 hectáreas, ¡sin cables!**

La fuente de alimentación de pilas le permite automatizar su sistema sin cables y **eliminar los costes de instalación.**

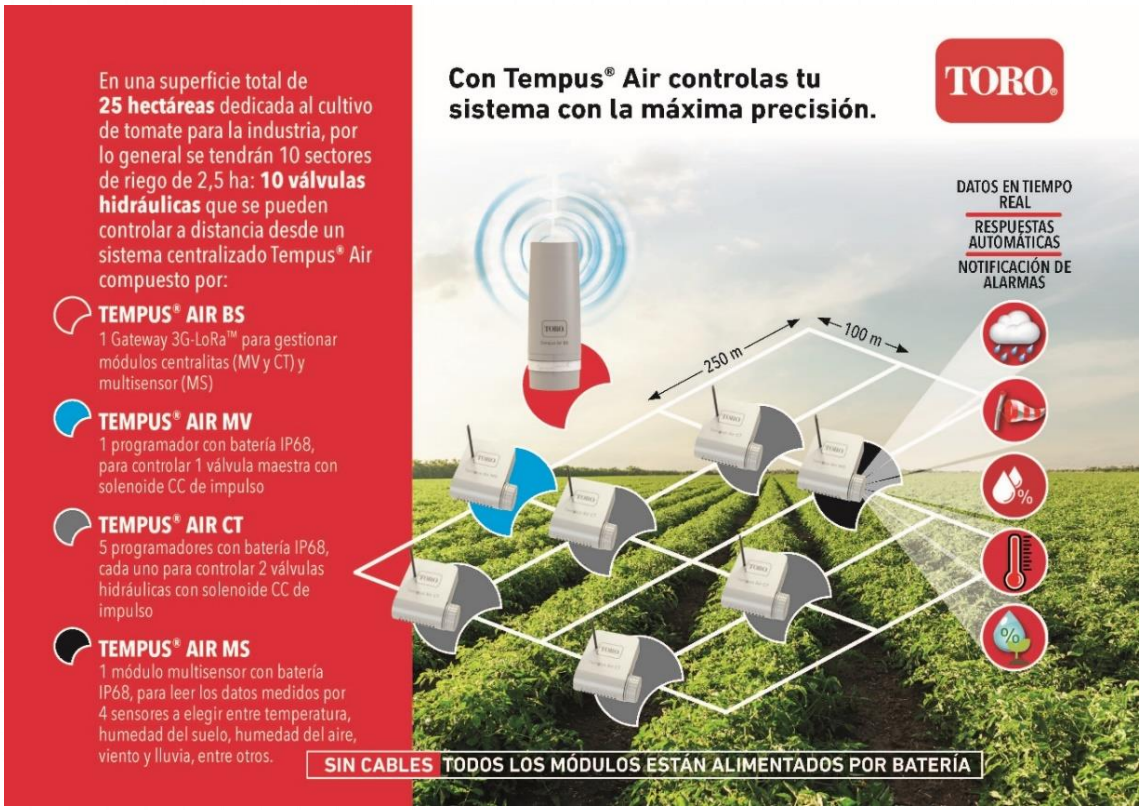
Tempus® Air se puede controlar de forma remota a través de la **plataforma web** o la **aplicación MyToroTempus**. Además, el usuario puede conectarse localmente a través de **Bluetooth.**

Los gateways, alimentados con 220 voltios o energía solar, reciben **las lecturas de los sensores de los módulos** y, en base a los datos recibidos, **envían comandos** y programas de riego. Las lecturas de los sensores son herramientas invalorables para optimizar la toma de decisiones y el uso de recursos.

Además, en función de los datos recopilados, Tempus® Air puede gestionar de forma autónoma los componentes del sistema de riego, como **válvulas hidráulicas, bombas, filtros y sistemas de fertiirrigación.**

El sistema es ideal para sistemas de riego de **cultivos estacionales o permanentes** y en terrenos propios o arrendados.

Toro Tempus® Air le permite crear un sistema de **riego inalámbrico automatizado**.

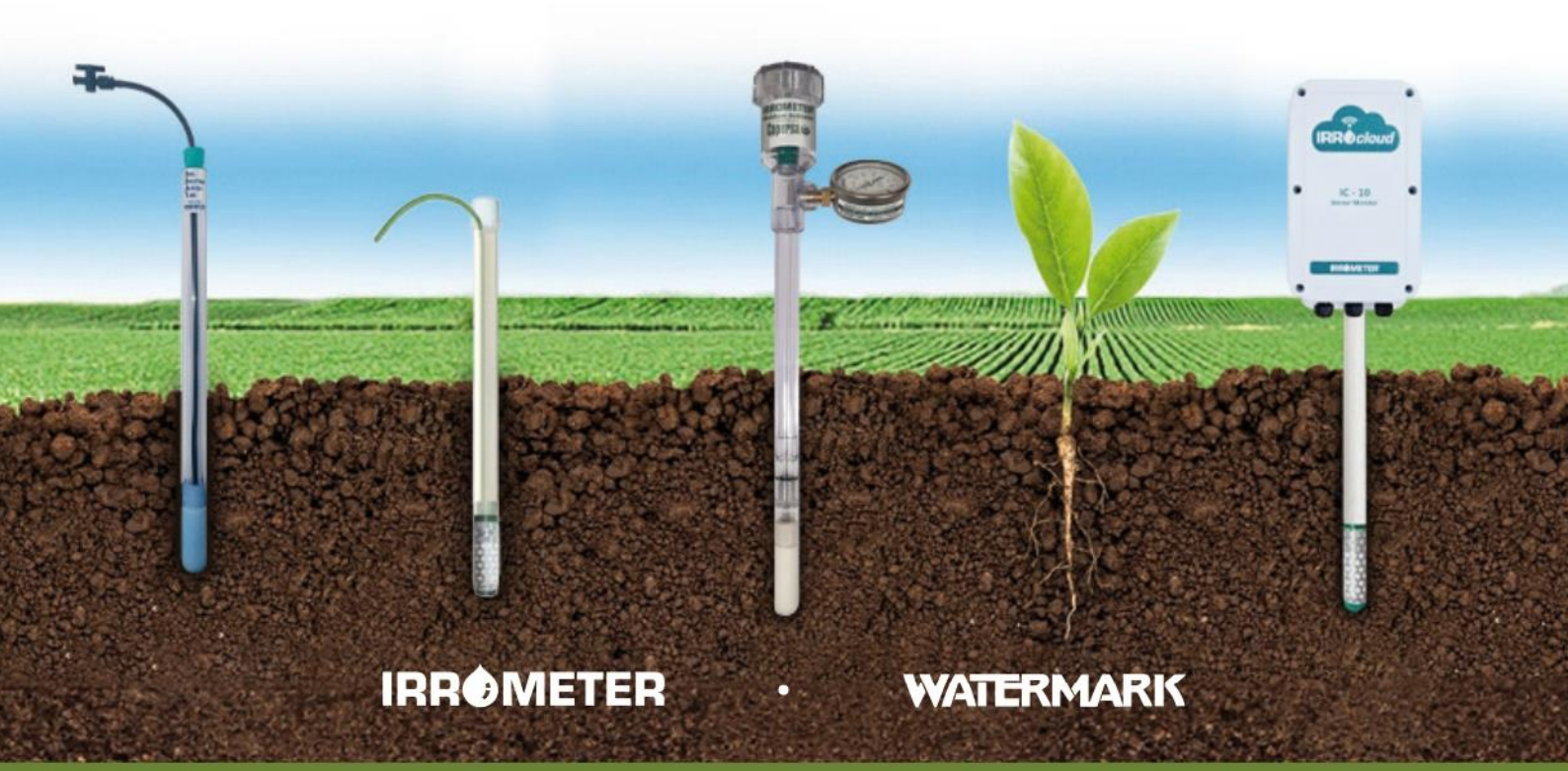


Contacto

TORO I.S.E. Srl
Via dell'Artigianato 1/3
00065 Fiano Romano (Roma) – ITALIA
Tel. +39 0765 40191
info@toro-ag.it
https://toro.com
https://toro-ag.it

Copersa

CONECTADOS A LA TIERRA PARA UN RIEGO EFICIENTE Y SOSTENIBLE



TENSIOMETRÍA · MEDIDORES DE HUMEDAD · REGISTRO Y TRANSMISIÓN DE DATOS · ACCESO REMOTO

www.copersa.com · comercial@copersa.com · +34 937 592 500

Senninger Spectrum Mazzei ODIS ITC MURPHY Eliptix BACCARA

2.4. Tecnología del riego

Juan Manzano Juárez[1]*, César González Pavón[2], Virginia Palau Estevan[3], Iban Balbastre Peralta[3]

[1] *Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente (DIHMA).Centro Valenciano de Estudios Sobre el Riego (CVER). Universitat Politècncia de València (UPV)*

[2] *Departamento de Física Aplicada. UPV*

[3] *Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria. Centro Valenciano de Estudios Sobre el Riego (CVER). UPV*

* *juamanju@agf.upv.es*

Índice

1. Introducción 150
   1.1. Componentes de la instalación de riego 152
   1.2. Organización y funciones en la red 153
   1.3. Tipologías básicas de instalaciones 154
2. Subunidad de riego y tipos de emisores 156
3. Hidrantes 159
4. Red de distribución y valvulería 161
   4.1. Modelo hidráulico 164
5. Cabezal: filtración y quimigación 165
   5.1. Filtración 165
   5.2. Quimigación 167
6. Medición 170
7. Automatización 171
8. Bombeo y suministros energéticos 173
9. Mantenimiento y auditoría 176

Resumen

En las explotaciones de regadío son constantes los esfuerzos por ahorrar agua, buena parte de ellos vinculados a la mejora tecnológica de las instalaciones. Con este objetivo se suelen adoptar emisores de riego (goteros o aspersores) para localizar y aplicar agua, e incluso fertilizante, en la zona radicular de la planta. Por otro lado, en el arco Mediterráneo existe una importante tradición de sistemas de riego gestionados colectivamente por agrupaciones de usuarios, que encauzan y transportan el agua hasta las parcelas de riego. Así es muy habitual que por medio de redes de riego comunitarias se realicen operaciones como captación, tratamiento,

distribución y aplicación del agua en parcela. En la mayor parte de los casos deben ser redes presurizadas que necesitan un aporte externo de energía por medio de grupos de bombeo. De este modo se define el escenario de la ingeniería del riego, donde se establecen diferentes subsistemas (subunidad de riego, hidrantes, red de distribución, filtración, inyección de productos químicos, impulsión, automatización, etc.). Un buen diseño y manejo de estos subsistemas tendrá como objetivo el riego uniforme y eficiente del cultivo, aplicando la cantidad de agua y fertilizantes adecuados, y con el mínimo consumo energético posible.

Pueden considerarse numerosas alternativas, tanto de definición de la instalación y sus componentes, como de organización de los turnos de riego o demanda de los usuarios. Para dar respuesta a estas alternativas, también es muy amplio el abanico de variantes tecnológicas; comenzando por el tipo de gotero y finalizando, p.e., por los sensores utilizados o el sistema informático de gestión que mejor se adapte a la organización del riego. Complementariamente, para mejorar la gestión del sistema de riego, se van integrando nuevas opciones como el suministro eléctrico por medio de energías renovables, los avances en los sistemas de comunicación y adquisición de datos o la integración de herramientas "inteligentes" para la toma de decisiones agronómico-hidráulicas.

En estos momentos, la tecnología está desarrollada para que se pueda ejecutar un riego de precisión y eficiente, pero ante la complejidad de las instalaciones debe prestarse atención a otras cuestiones relevantes, a veces olvidadas en instalaciones de riego. En primer lugar, la formación de los técnicos y gestores ha de ser lo suficientemente especializada como para aprovechar al máximo las capacidades de la instalación. Por otro lado, se trata de infraestructuras de uso intensivo y muy expuesto; por tanto, las auditorías y evaluaciones de funcionamiento, más la planificación del mantenimiento de todos los subsistemas debe ser periódica y estricta.

En este capítulo se revisa la instalación de riego: se definen las características de los sistemas, sus componentes, la forma de organizarlos y algunos de los problemas que pueden encontrar usuarios y técnicos. El objetivo último tanto en el diseño como en la operación de la instalación será maximizar el rendimiento agronómico, hidráulico y energético de la explotación.

1. Introducción

La fruticultura mediterránea ha sufrido una fuerte tendencia de modernización en las últimas décadas, evolucionando de sistemas de riego tradicionales a sistemas a presión. En España en la actualidad el riego a presión supone el 79% de la superficie total de riego, siendo el 58% riego localizado (ESYRCE, 2014). En algunas zonas, como la Comunidad Valenciana, donde el cultivo de frutales es mayoritario, los sistemas presurizados constituyen más del 75% de la superficie total de riego. Mayoritariamente, estos sistemas están organizados en estructuras de riego colectivo y dependientes de comunidades de regantes (Sanchis-Ibor *et al*., 2021). Es común que el sistema abarque todas las fases, tanto la aplicación de agua de riego en parcela por medio de emisores, como las infraestructuras requeridas para la captación, almacenamiento, transporte y distribución de agua. (Abadía *et al*., 2008).

Este proceso de modernización conlleva una serie de ventajas: reducción de las pérdidas de agua en las redes de transporte y distribución, adaptación a topografías irregulares, posibilidad de facturación del agua consumida por cada agricultor, aumento de la eficiencia y el control del uso del agua en microrrigación, riego inteligente a través de sensores, etc. (Ortega-Reig *et al*., 2017; Playán y Mateos, 2006). En manos de gestores expertos, los sistemas tecnificados permitirán mejorar el comportamiento hidráulico y la eficiencia del sistema desde la captación hasta el emisor de riego.

La eficiencia del riego se puede medir bajo diferentes indicadores, algunos habituales son la eficiencia de uso de agua (WUE) o la eficiencia de aplicación del agua de riego (Ea). Este último se puede definir como el volumen de agua de riego disponible para la evapotranspiración del cultivo respecto al volumen de agua aplicada en parcela desde el emisor. Si se amplía el foco sobre el conjunto de la instalación, aparecerá la eficiencia en el transporte y captación, para definir la eficiencia hidráulica del sistema. Por otro lado, y ahora en términos de rendimiento energético, también se puede obtener la eficiencia de los equipos de bombeo responsables de proporcionar la energía que requiere el volumen de agua suministrado. Si se extiende a la superficie abastecida y se incluyen los costes energéticos se tiene un esquema complejo de términos adicionales de eficiencia a considerar (Figura 1). Ajustando los requerimientos de caudal y presión en parcela (Q_p y H_T) mejoran todos los indicadores. Complementariamente, actuando en la eficiencia hidráulica o en los rendimientos del bombeo, que dependen del diseño y manejo de la instalación, se alcanza un segundo escalón. Finalmente, se puede incrementar la sostenibilidad económica si se combinan diferentes fuentes de suministro energético.

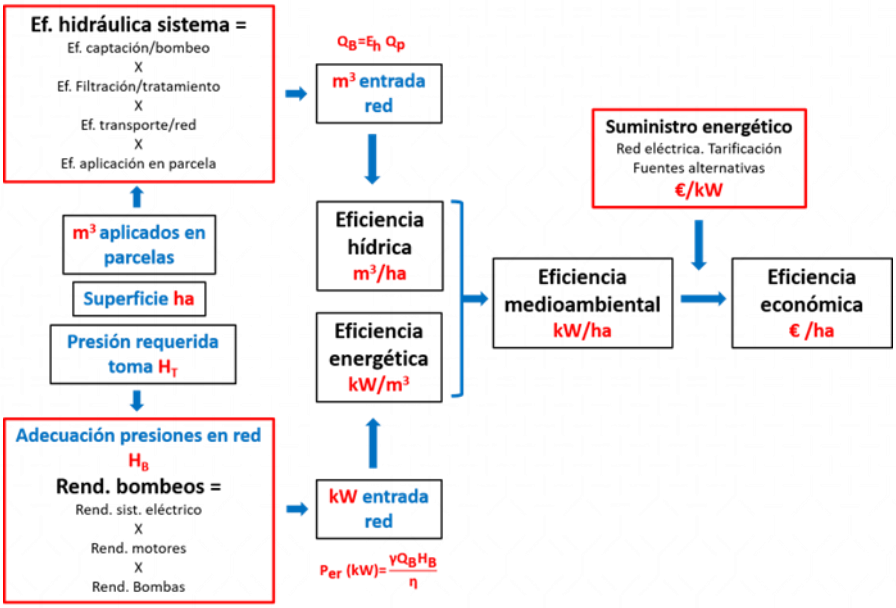


Figura 1. Eficiencias en un sistema de riego

En otros capítulos de este libro se resuelve con precisión cuál es el volumen de agua que requiere el cultivo y cuando ha de aplicarse, a partir de la determinación del estado hídrico del cultivo y la programación de riegos. De esta forma, se parte de un diseño agronómico bien definido, que minimiza las pérdidas por infiltración o evaporación, humedeciendo adecuadamente la zona radicular y con la adecuada separación de emisores y laterales de riego. Están identificadas las necesidades de riego (Nr (l/m^2 x día)) y el intervalo entre riegos (I (días/riego), una vez

seleccionado un caudal y marco de goteros (q (l/h x m^2)) ha de fijarse un tiempo de riego en cada parcela (Tr (h/riego)), para cada riego y por unidad de superficie tendremos:

$$Vol_{requerido}\left(\frac{1}{m^2 riego}\right) = Nr\left(\frac{1}{m^2 día}\right) I\left(\frac{día}{riego}\right) = q\left(\frac{l}{hm^2}\right) Tr\left(\frac{h}{riego}\right) = Vol_{suministrado}\left(\frac{l}{m^2 riego}\right)$$

En este capítulo se pretende revisar los elementos de la instalación de riego, que son los que condicionan la parte derecha de la ecuación anterior. Es decir, aquello que va a permitir hacer viable la aportación de los caudales necesarios en los tiempos correctos, incidiendo en los aspectos que ayuden al uso correcto del agua. También se tratará el uso y distribución de fertilizantes en el agua de riego, ya que el control de esta fertirrigación en riego colectivo puede resultar compleja para lograr uniformidad y un aporte equitativo de nutrientes.

1.1. Componentes de la instalación de riego

Los compontes de una instalación de riego localizado comienzan en el emisor junto a la planta, y remontando aguas arriba, la subunidad de riego con sus laterales que conectan a una tubería terciaria. Esta terciaria se conecta a un hidrante mono o multiusuario que, a su vez, estará siendo abastecido por la red de distribución. Al comienzo de la red de distribución se situará habitualmente el cabezal de riego, con el punto de captación de agua y todos los elementos necesarios para que funcione, como bombas, filtros y automatización. La Figura 2 muestra un ejemplo de este sistema con cada uno de sus subsistemas. No va a existir un esquema fijo, cada explotación tendrá sus adaptaciones particulares, siendo amplia la casuística de tipologías.

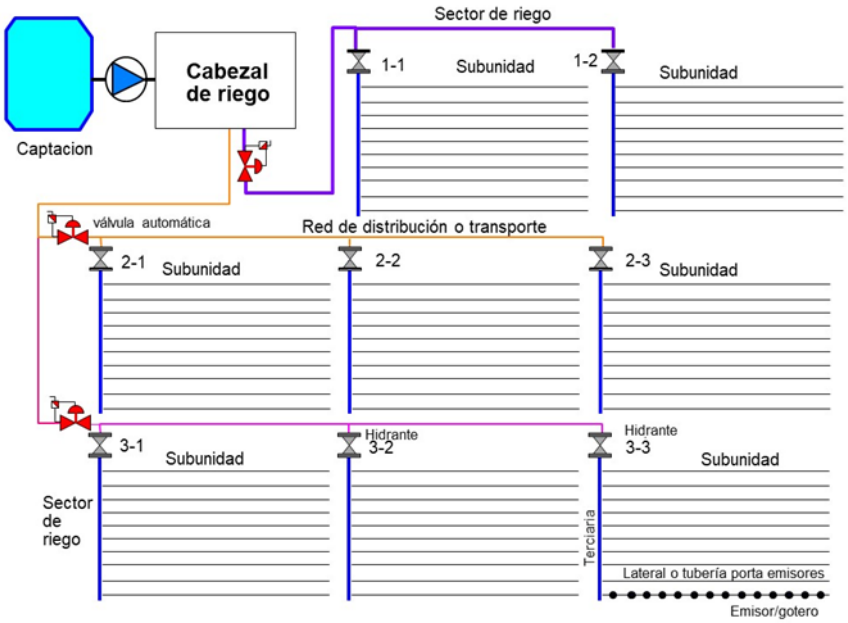


Figura 2. Esquema general de una instalación de riego a presión

Sin embargo, se puede establecer el siguiente listado de subsistemas de la instalación.

- Impulsiones y sistemas de bombeo
- Elementos de filtración
- Elementos de inyección de soluciones químicas; dispositivos de fertirrigación
- Dispositivos de control; medición de caudal y presión
- Valvulería: Elementos de regulación, maniobra y protección
- Sistema de automatización; programadores y elementos de comunicación

- Conducciones; tuberías y elementos auxiliares
- Hidrantes
- Subunidad: terciaria, laterales y goteros

1.2. Organización y funciones en la red

En una red comunitaria el reparto del agua de riego puede hacerse "a la demanda" o por "turnos" (o sectores). En el primer caso, es el usuario final quien decide y opera el momento y la duración del riego, suponiendo una organización totalmente flexible. En un riego por turnos estricto se tiene un esquema rígido, donde el riego se programa centralizadamente y son los técnicos o gestores de la red quienes determinan las tomas que están abiertas en cada sector. Se establece un funcionamiento ordenado y secuencial, agrupando de forma fija y predeterminada la frecuencia y tiempos de riego. Entre los dos extremos organizativos, pueden existir múltiples variantes flexibilizando turnos o condicionando, por ejemplo, con ventanas horarias, el riego a demanda.

Un tipo de gestión u otra, obliga a decisiones importantes tanto en el diseño de la instalación como en su operación posterior. Particularizando, por ejemplo, en el sistema de automatización, para poder organizar por turnos una red es preciso que existan electroválvulas. Éstas pueden situarse a nivel de toma, hidrante o sector, según se decida en cada red. El número de electroválvulas será mucho mayor si la automatización es hasta nivel de toma (o parcela). En este caso, se tiene la capacidad de operar sobre una parcela determinada, lo cual se pierde en agrupaciones superiores de automatización (electroválvula por hidrante multiusuario o sector). En una red a la demanda no es preciso que existan electroválvulas, al ser el usuario quien abre o cierra su instalación a voluntad. Por el contrario, otras operaciones como realizar fertirriego comunitario (si se quieren aplicar dosis diferenciadas), o el manejo hidráulico de la red y el bombeo se hace más complejo.

Desde el punto de vista del ahorro de agua y energía, se asume que con un esquema de riego por turnos se logra un uso más eficiente de agua y energía, aunque se sacrifique la flexibilidad para las operaciones del usuario final. Sin embargo, también se pueden llegar a altas eficiencias en sistemas a la demanda, siempre y cuando tecnología de control y automatización de la red permita una buena regulación de caudales y presiones.

Definir el modo de operación de la red es importante, y también será básico para el proyecto y la obra inicial; se trata de concretar las operaciones que se realizarán colectivamente frente a las que asumirá el usuario final. Algunas resultan evidentes, los elementos a pie de parcela (subunidad) los controla el usuario mientras que las tareas de captación, regulación y distribución de agua o protección hidráulica de la red las debe asumir el equipo de técnicos o gestores de la red. La maniobra y automatización de las tomas, la filtración o la fertirrigación pueden estar centralizadas, o cada usuario tomar sus propias decisiones y elegir sus equipos individualmente. Para una organización eficiente de las operaciones, esta última opción, haría necesaria una buena coordinación para evitar solapes o duplicidad de equipos entre las estructuras comunitarias y las particulares.

Otro factor importante en las redes de distribución colectiva es la procedencia de la energía eléctrica para el funcionamiento de los distintos equipos que la requieren. El principal elemento que consume energía en estos sistemas es el equipo de bombeo que suministra la altura

manométrica y caudal demandados por la red. Otros equipos que también consumen energía, pero en menor medida, son los equipos de filtrado, sistemas de automatización, equipos de fertirrigación, apertura y cierre de valvulería, sondas de humedad, etc.

En la actualidad, existen estaciones de bombeo con suministro eléctrico de la red, con grupos electrógenos abastecidos por combustibles fósiles, con energías renovables o con sistemas híbridos de dos o tres tipos mencionados (Figura 3). Hasta la fecha, lo más común ha sido alimentar los equipos de bombeo mediante energía procedente de la red eléctrica. Bien es cierto, que en el mundo rural no siempre es sencillo encontrar conexión cercana a la red de media o alta tensión, por lo que todavía es frecuente encontrar estaciones de bombeo alimentadas con grupos electrógenos.

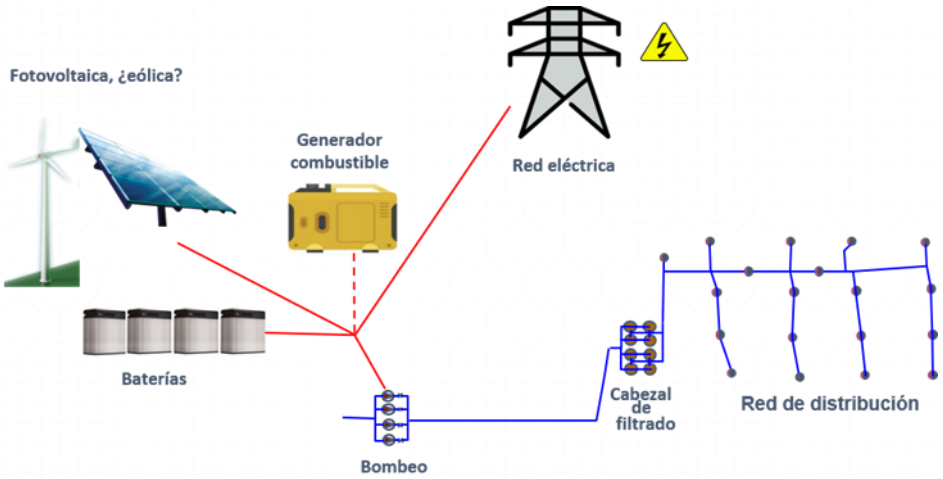


Figura 3. Alternativas de suministro energético

Con la llegada de las energías renovables, es cada vez más frecuente encontrarse con estaciones de bombeo alimentadas mediante energía solar fotovoltaica. La aparición de estas, junto con el gran número de ayudas y subvenciones que existen hoy, ha llevado a muchas comunidades de regantes y otras entidades de riego a decantarse por este tipo de suministro energético. En la mayoría de las ocasiones se proyectan sistemas híbridos de autoconsumo que permiten utilizar de forma simultánea energía solar y suministrada por la red eléctrica.

En el contexto de la agricultura mediterránea donde el patrón de cultivos existentes tiene sus mayores necesidades hídricas en la época estival y se reducen considerablemente en el invierno, los sistemas híbridos que se instalan consiguen unos valores de autoconsumo superiores al 60% reduciendo la energía aportada por la red en valores cercanos al 70% con una buena gestión de la energía producida.

Es evidente que, para un correcto aprovechamiento de las energías renovables en el contexto del bombeo para riego, se han de cambiar los hábitos de consumo. Los mayores consumos se han de trasladar al día donde la irradiancia es mayor y pasar el resto de consumo al periodo nocturno de la tarifa eléctrica donde es más económico el término de energía.

1.3. Tipologías básicas de instalaciones

Frente a los sistemas tradicionales de riego por superficie, donde el agua se reparte mediante canales y acequias hasta las parcelas gracias a la acción de la gravedad, en sistemas presurizados se va a requerir un aporte externo de energía. La presurización es necesaria tanto para el

transporte como para el funcionamiento correcto de los emisores, del mismo modo, la mayoría de los filtros y muchos elementos de valvulería requerirán, para su correcta operación, una presión mínima. Como se ha comentado, cada comunidad de regantes tendrá sus particularidades en su esquema hidráulico y condiciones de operación. Por otro lado, es habitual que las instalaciones de riego a presión tengan que adaptarse durante el transcurso de los años a variaciones en la red, tanto de elementos (p.e. tipo de emisores, filtros o hidrantes) como de superficie y tomas o puntos de suministro de agua. Esto previsiblemente, modificará las necesidades energéticas.

En cuanto al tipo de la red de distribución, muchas instalaciones se pueden clasificar como redes simples ramificadas, con un comportamiento hidráulico fácil de entender y analizar. Sin embargo, en otros muchos casos, las necesidades cambiantes de las explotaciones obligan a combinar esquemas mallados. El establecimiento mallas, por la inclusión de diferentes puntos de suministro de agua o por la unión entre ramificaciones, hará más compleja la regulación y el transporte de agua en una red.

Esquematizando mucho, y dentro de las redes ramificadas, se puede hablar de dos tipologías básicas de una red de riego a presión. Por un lado, tendremos aquellas que, después un sondeo o un depósito realizan un bombeo directo a la red; la otra posibilidad requiere la existencia de un depósito a cota elevada y suficiente para que la red quede presurizada, la red funciona en este caso "por gravedad". En este segundo caso, el depósito a cota elevada se abastecerá desde una corriente en lámina libre (canal o rio) en algunas ocasiones. Pero en otros muchos casos habrá sido necesario un bombeo previo desde el punto de captación, elevando hasta el depósito de inicio de red. En la Figura 4 se presenta esta última opción, donde se muestra una red alimentada por gravedad, aprovechando la cota elevada de un depósito de regulación. El depósito de regulación es llenado previamente desde un sondeo.

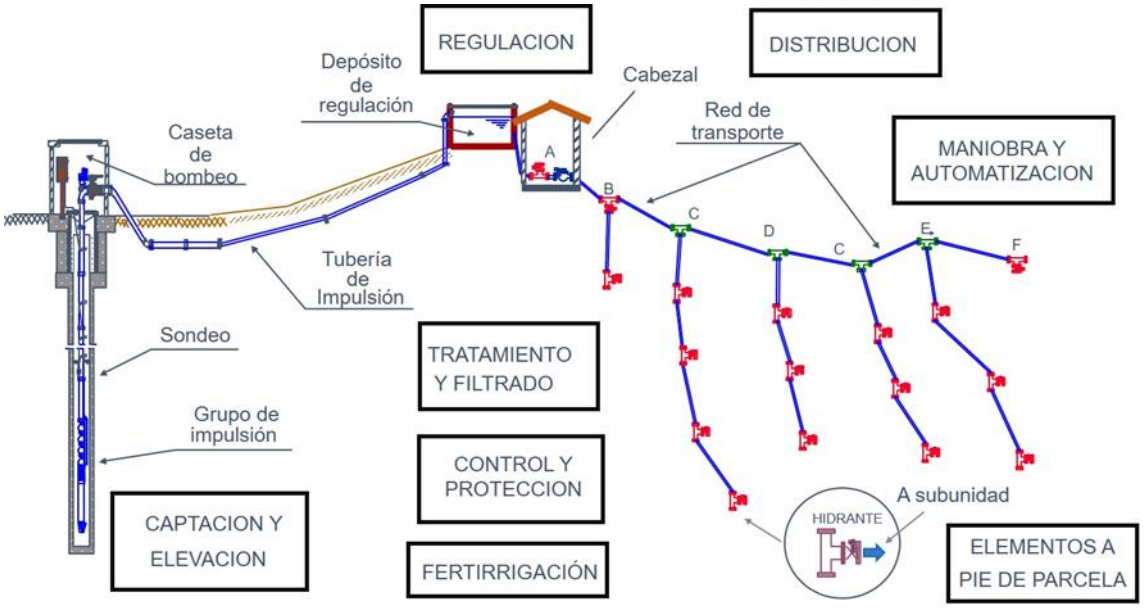


Figura 4. Esquema de una red de riego alimentada por gravedad, con alimentación de depósito desde bombeo previo. Son remarcadas las operaciones principales en la red

2. Subunidad de riego y tipos de emisores

Se entiende como subunidad de riego el conjunto de emisores conectados a las respectivas tuberías porta emisores o laterales de riego, y que, a su vez se unen a una tubería terciaria. Estas tuberías y emisores se controlan hidráulicamente con un elemento para su apertura y cierre y/o regulación. Como elementos de un sistema automatizado o de precisión, la subunidad de riego constituye la unidad mínima de operación en una red, debiendo garantizar un riego homogéneo (Arviza, 1996).

Los emisores son los elementos clave usados para dosificar el agua a la parcela, se distingue entre aspersores y goteros, siendo estos los últimos los empleados principalmente para el riego de frutales en la región mediterránea. El gotero es el dispositivo por el cual sale el agua, sin energía, de la tubería a presión, dando lugar a un goteo característico que le da nombre. Los caudales, necesariamente, son muy bajos (el caudal máximo de un emisor de riego por goteo se establece en 20 l/h, aunque no es usual encontrar valores superiores a 8 l/h) y la superficie mojada discreta.

A su vez los goteros se pueden clasificar siguiendo diferentes criterios. Una posible propuesta tendría en cuenta su característica hidráulica o la forma de conectarlos a la tubería portaemisores (lateral).

Tabla 1. Clasificación de emisores según criterios hidráulicos y tipo de conexión

Según su comportamiento hidráulico	Compensantes	Por mecanismo de cierre	antidrenantes
			no antidrenates
	No compensantes	Por geometría interna	de laberinto
			de husillo
			de tobera u orificio
Según su conexión al lateral	Interlínea		
	Sobre línea o pinchados		
	Integrados	Según el espesor de la conducción	Cintas de riego
			Tuberías emisoras

Existen gran cantidad de modelos, con múltiples variantes para su adaptación a los requerimientos de funcionamiento, como tamaño de parcelas, terrenos con pendientes acusadas o riegos subterráneos. Debiendo estar bien caracterizados su caudal nominal y sus presiones de funcionamiento, curva características o sensibilidad a las obturaciones. También debe estar bien definida su calidad por medio del coeficiente de variación de fabricación ($\mathrm{CV} = 100\,\frac{\mathrm{SD}}{\bar{q}}$, siendo $\bar{q}$ el caudal medio y SD su desviación estándar). Todo esto, así como cuestiones relativas a la conexión o las características de los materiales establecido en la norma UNE-EN ISO 9261 (UNE-EN ISO 9261 2010) con el título “Equipos de riego. Emisores y tuberías emisoras. Especificaciones y métodos de ensayo.”

Muchos modelos de goteros compensantes incluyen mecanismos adicionales para mejorar el funcionamiento de la instalación y el ahorro de agua; aparecen variantes como los goteros antidrenantes o los autolimpiantes. Los goteros antidrenantes son aquellos que incorporan un mecanismo de cierre para que la tubería no se descargue cuando no se está regando y deja de

recibir la presión de funcionamiento. Los autolimpiantes tienen un mecanismo que evita que se depositen elementos extraños en el emisor.

Figura 5. Ejemplos de goteros en derivación/pinchados (izq.) y en línea (dcha.)

En el diseño y manejo de una subunidad de riego, la situación ideal sería aquella en que todos los emisores aportan el mismo caudal, lográndose una alta uniformidad de distribución de agua, y por tanto de los nutrientes que pueda transportar. Esto va a asegurar que todas las plantas de esa parcela reciban un mismo volumen por riego. Sin embargo, esto es imposible de conseguir, puesto que ya el propio emisor presenta un determinado CV. (Keller y Karmeli, 1974), propusieron una expresión para el cálculo de la uniformidad de emisión (UE), que tiene en consideración el coeficiente de variación de fabricación (CV), el comportamiento hidráulico de la subunidad, expresado por medio de los caudales máximo y medio (q_{min}, q_{med}), y el número de emisores por planta (n_e).

$$UE = \left(1 - \frac{1{,}27 \cdot CV}{\sqrt{(n_e)}}\right) \cdot \frac{q_{min}}{q_{med}}$$

La utilización de emisores de buena calidad con un coeficiente de variación inferior al 7% (según UNE-EN ISO 9261 2010) supone en la práctica valores de UE superiores al 90 %. Estas uniformidades son perfectamente alcanzables, aunque en un análisis más completo, la variación del caudal del emisor también se ve afectada por diferencias debidas a variaciones hidráulicas, además de fabricación de los emisores. Una vez que los emisores están instalados y en funcionamiento, en el CV pueden influir otros aspectos determinantes en la variabilidad del caudal como son la agrupación de emisores o la obturación. Al repartir el volumen necesario por planta entre varios emisores, se logra mejorar la uniformidad de aplicación del agua. Por el contrario, las obturaciones, al reducir la sección mínima de paso o limitar el mecanismo de compensación de presión, van a condicionar negativamente la variabilidad. Estas obturaciones van a producirse por depósitos minerales, sedimentos, algas u otros materiales presentes en el agua de riego y su influencia ha sido claramente identificada e incluida en la variación del caudal (Bralts *et al*., 1987; Bralts *et al.*, 1981).

En resumen, goteros de mala calidad, diferencias elevadas de presión, presión en los emisores incorrectas o un mal manejo de la instalación (p.e. falta de limpieza, filtración o aguas de mala calidad que provoquen obturaciones de los emisores) son las causas principales de que no se alcance una UE adecuada. Una mala uniformidad tendrá como consecuencia una producción desigual o un despilfarro de agua, puesto que la instalación estará corregida en su funcionamiento para aquellos emisores que arrojan un caudal más bajo.

De acuerdo con el comportamiento hidráulico de los emisores, la norma ISO distingue entre emisor (o tubería emisora) con o sin regulación de presión, también llamados auto-compensantes y no compensantes, respectivamente. En los primeros el caudal arrojado es constante dentro de un amplio rango de presiones (rango efectivo de presiones). Para los no regulados o no compensantes, el caudal varía al variar la presión de funcionamiento, definido esto por su curva característica ($q = K \times H^x$, siendo H: presión de funcionamiento, q: caudal, x: exponente de descarga y k: coeficiente de descarga). En todo caso, la presión es un parámetro que estará ligado a un correcto caudal de funcionamiento.

Así por ejemplo se entiende que un riego es adecuado si la máxima variación relativa de caudales en una subunidad es inferior al 10 %; $(q_{max} - q_{min})/q_{med} \leq 0{,}1$.

Con emisores no compensantes y a partir de su curva característica, se obtiene la siguiente relación (siendo ΔH_S la diferencia de presiones admisible en la subunidad y $\overline{H}$ la presión media de funcionamiento del emisor):

$$q = K \times H^x \rightarrow \frac{dq}{q} = x\frac{dH}{H} = x\frac{\Delta H_s}{\overline{H}} \rightarrow \Delta H_s = \frac{0{,}1}{x}\overline{H}$$

Esta relación deja un margen muy estrecho para la variación de presiones en la subunidad que oscila entre 1,8 a 2,2 m.c.a (metros de columna de agua), dependiendo de dicho exponente, y requiere un diseño de la subunidad cuidadoso para un riego correcto.

Para los emisores compensantes es diferente, esta variación viene acotada por el rango de compensación para el cual el caudal es constante ($\Delta H_S = H_{max} - H_{min}$). No es recomendable que exista una variación tan alta de presiones dentro de una subunidad, ya que puede dar lugar a requerimientos excesivos de presión al inicio del sistema y mayor riesgo de fugas y roturas. Tampoco es recomendable ajustarse demasiado a la presión mínima del rango teórico, pensando en la pérdida de compensación de presión a largo plazo. Por el contrario, con emisores no compensantes, la presión que es necesario suministrar al comienzo de la subunidad tiende a ser sensiblemente inferior.

Una vez fijada la diferencia de presiones admisible en la subunidad y conocida la diferencia de cotas en la misma, a través de la ecuación de la energía o de Bernoulli, quedan determinadas las pérdidas de carga máximas y pueden establecerse los diámetros correctos de lateral y terciaria. Así, queda vinculado el caudal y la presión necesarios al comienzo de cada subunidad.

$$\Delta H_S = \Delta H_{lateral} + \Delta H_{terciaria} = \Delta z_{lat} + h_{lat} + \Delta z_{ter} + h_{ter}$$

En esta relación, Δz es la diferencia de cotas en las tuberías, h_{lat} y h_{ter} son respectivamente las pérdidas de carga en lateral y terciaria que dependen estrechamente de cada diámetro elegido.

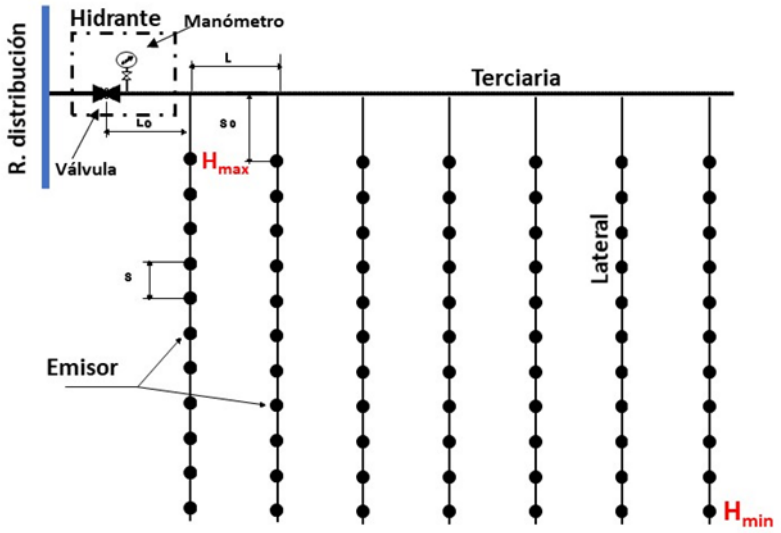


Figura 6. Esquema de subunidad. Ubicación de los emisores de mínima y máxima presión en una subunidad horizontal

La subunidad de riego localizado puede instalarse sobre la superficie del suelo o puede optarse por instalarse enterrada (10-40 cm). El principal objetivo de enterrar los goteros es reducir la evaporación acercando el punto de emisión a la raíz de la planta. También va a facilitar el uso de aguas residuales y reduce el desarrollo de vegetación no deseada (Martínez-Gimeno *et al*., 2018). Sin embargo, aumentan los costes de instalación, no solo por la necesidad de realizar zanjas, sino también porque se requiere mallar los laterales, uniéndolos con una tubería adicional en su extremo final e instalar purgadores si los goteros son no-antidrenantes (Juana y Sánchez, 2024). El tipo de gotero también encarecerá la instalación, en riego subterráneo es recomendable el uso de goteros compensantes y antisucción, para que la conducción permanezca cargada de agua cuando termine el riego y no se produzca succión desde el suelo. Aunque está contrastado que se produce un ahorro de agua con estos sistemas, el hecho de tener un sistema enterrado, donde no se pueden detectar fugas y roturas, obturaciones, intrusión o pinzamiento radicular en las tuberías, hace que no sea una solución extensamente adoptada.

Finalmente, además de un correcto diseño, tanto el montaje en parcela (correcta ubicación de emisores y líneas) como el mantenimiento, deben ser apropiados. El exceso de presión puede dar lugar a roturas y fugas, pero las líneas de goteros también pueden dañarse por la exposición a condiciones climáticas adversas, al crecimiento de raíces, o al contacto con herramientas, maquinaria o incluso la afección por roedores.

3. Hidrantes

Los hidrantes son las derivaciones desde la red de distribución hasta cada parcela o grupo de parcelas. Se distingue así entre hidrantes monousuario, con una única toma o salida hacia parcela, e hidrantes multiusuario con tomas agrupadas. En este último caso, los elementos de control del agua consumida y de gestión automática de varias parcelas se disponen en un único

punto de conexión a la red, esto simplifica el diseño y la operación de redes a presión (Jiménez-Bello *et al*., 2011; Moreno *et al.,* 2010).

La norma europea EN 14267: Irrigation techniques - Irrigation hydrants (2004) (AEN/CTN68 UNE-EN 14267 2005) define esta infraestructura como un sistema de válvula integrada diseñada para asegurar el suministro del agua de riego en una red comunitaria de regantes. Así, desde un punto de vista funcional, su misión siempre consistirá en la de apertura y cierre y medición de caudal, garantizando una presión y caudal en parcela; pero también puede incorporar funciones de limitación de caudal y regulación de presiones. La norma EN 14267 define los siguientes tipos y la pérdida de carga asumible (Δh_H) según su función.

Tabla 2. Tipología y perdida de carga en hidrantes de riego según su función

Tipo	Función	Δh_H (kPa)
1	Apertura/cierre y medición	50
2	Apertura/cierre y medición, limitación de caudal	80
3	Apertura/cierre y medición, regulación de presión	80
4	Apertura/cierre y medición, limitación de caudal y regulación de presión	110

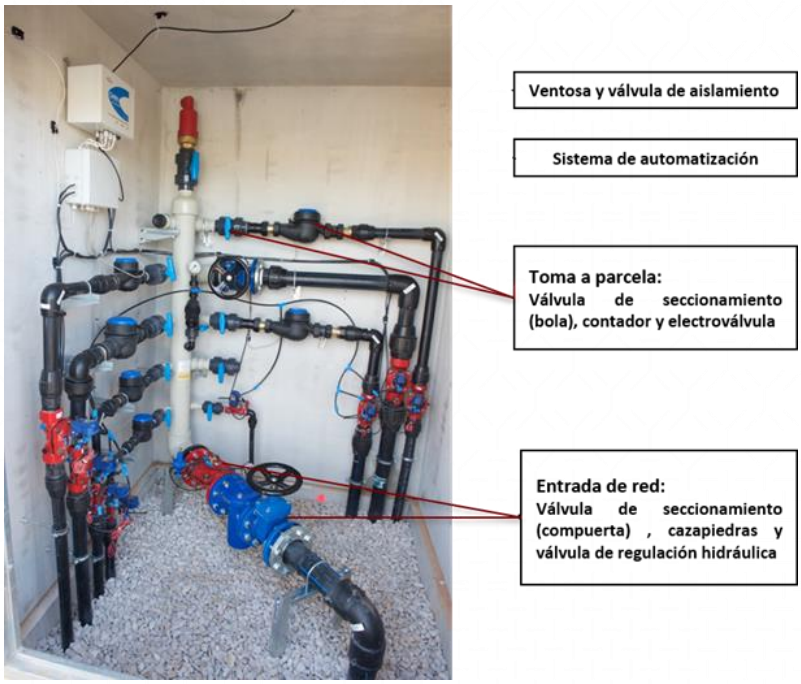


Figura 7. Hidrante multiusuario

En una red eficiente, dotada de hidrantes multiusuario es normal que se integren estas funciones más allá de la apertura o cierre. En su configuración, bajo la misma caseta o arqueta, habrá una conducción principal o colector conectado a la red y una agrupación de tomas de salida donde se instalan contadores individuales y electroválvulas (Figura 7). Además, y para cumplir la función encomendada se encontrarán válvulas de paso, hidráulicas de regulación, manómetros, ventosas, filtros y todos aquellos elementos hidráulicos o de automatización requeridos para que cumpla su función (Balbastre-Peralta *et al*., 2021).

Es obvio que el diseño y la configuración de los hidrantes multiusuario afecta principalmente a parámetros hidráulicos como la pérdida de carga que producen y los caudales que trasiegan por

cada toma. Una adecuada presión en el hidrante multiusuario implica que las parcelas a las que abastece tengan una buena uniformidad de emisión en el riego. Además de la pérdida de carga inherente a los elementos hidráulicos del hidrante, y teniendo en cuenta el comportamiento de una red a presión, esta va a llegar con exceso a la mayoría de las tomas. Esto requerirá su regulación, generalmente con válvulas reductoras, forzando la disipación de energía en ellas.

También es claro que el incorrecto funcionamiento de los hidrantes puede acarrear problemas en la gestión de la red de riego. Un fallo en los sistemas de adquisición de datos deriva en un uso ineficiente del agua por parte del agricultor y en una mala gestión técnica de las comunidades de regantes (González-Pavón *et al*., 2020; Perry *et al*., 2009). Los volúmenes registrados por los contadores son fundamentales para lograr un uso eficiente del riego a través del control de consumos de cada usuario (Fernández-Pacheco *et al*., 2015).

Por último y como se ha explicado, las electroválvulas recibirán las señales automáticas y a distancia, traduciéndolas en la apertura o cierre de las tomas. El hidrante incorporará las unidades de campo del sistema de tele gestión encargados de emitir las señales de control de tiempos de riego (sobre electroválvulas) o recibirlas desde los contadores o sensores de presión. En aquellas instalaciones que incorporen sensores agroclimáticos o de humedad de suelo, también serán estas unidades de campo donde se recojan estos datos básicos para controlar la programación de riego.

4. Red de distribución y valvulería

Desde el punto de suministro, la red de distribución transporta el agua a presión a cada hidrante. Los elementos básicos que la componen son tuberías y elementos accesorios (uniones y codos), pero también se engloba en ella otros elementos indispensables como bombas, filtros, válvulas y automatismos. La red debe diseñarse y manejarse para que se garantice el caudal, la presión y en su caso la cantidad de fertilizante necesarios en cada toma; esto con el mínimo consumo energético posible.

Desde la fase de diseño han de incluirse criterios racionales (Horst, 1998). Las condiciones de servicio en los hidrantes, en cuanto a caudal y presión se refiere, determinan la calidad de funcionamiento de la red y, por tanto, repercuten en su dimensionado y en todas las variables que a éste afectan. Para lograr la calidad de funcionamiento deseada, en el dimensionado se van a aplicar técnicas de optimización técnico-financieras donde lo que se busca es minimizar una función que engloba los costes fijos de instalación y los de explotación (Arviza-Valverde, 2017) o únicamente los de explotación (Lapo *et al*., 2020). Debe tenerse en cuenta que la mayor parte de los costes de explotación se deben al suministro eléctrico del bombeo.

Como ya se ha comentado la organización de la red puede ser a la demanda o por sectores. La primera forma permite un uso más flexible por parte del usuario, pero complica el manejo racional de los componentes de la red, aparte de condicionar el diseño, que resulta ser más caro (Jiménez-Bello *et al*., 2008). En la actualidad, existe una tendencia a la sectorización pues permite tener un mayor control sobre el volumen consumido y los tiempos de riego de cada usuario. Por otro lado, es mucho más compatible con el uso de energías alternativas para el suministro eléctrico.

En cualquier caso, se hace necesario disponer de información de partida de calidad con la que se elaborará la función objetivo. Hay muchas técnicas de optimización, son frecuentes las basadas en algoritmos matemáticos como los genéticos o los metaheurísticos e incluso métodos de análisis multicriterio, que permiten diseñar las redes y optimizarlas según la localización de los elementos hidráulicos. Muchos de estos métodos se apoyan en Sistemas de Información Geográfica (SIG). En este caso, además de los costes derivados de la instalación, se tienen en cuenta diferentes criterios como la facilidad de acceso a las redes en la fase de explotación o las afecciones en fase de obras (González-Pavón *et al*., 2020).

Existe una amplia gama de materiales válidos para las tuberías, que va desde el hormigón hasta los plásticos, teniendo muchos de ellos campo de aplicación en riego. Los más habituales son polietileno (PE), policloruro de vinilo (PVC), polipropileno (PP), poliéster reforzado con fibra de vidrio (PRFV), la fundición dúctil (FU) y los aceros galvanizados (AC) e inoxidable (ACI). Según los diámetros, presiones de trabajo y finalidad del tramo de tubería, unos materiales serán preferibles a otros. Por ejemplo, los laterales son siempre de polietileno y en grandes colectores a medida, se suele usar acero. Sin embargo, hay que considerar la gran importancia que tienen los materiales termoplásticos, puesto que presentan una serie de características que los hacen adecuados para su utilización en sistemas de riego; como son el ser ligeros y de alta resistencia, lo que no solo ha permitido el abaratar costes de instalación, sino que permiten mejores estanqueidades, y vidas útiles elevadas, ya que son inertes e inoxidables. Cada material está sometido a una estandarización y normativa estricta, donde entre otras cosas se fijan sus características de servicio, presión y diámetro nominal.

Toda red de distribución de agua a presión exige instalar una serie de dispositivos de maniobra, control, regulación y protección. Las configuraciones y tipos son muy diversos, desde aquellas que se utilizarán solo para abrir o cerrar una tubería, hasta las que se destinan para controlar un bombeo o protegerlo frente al golpe de ariete.

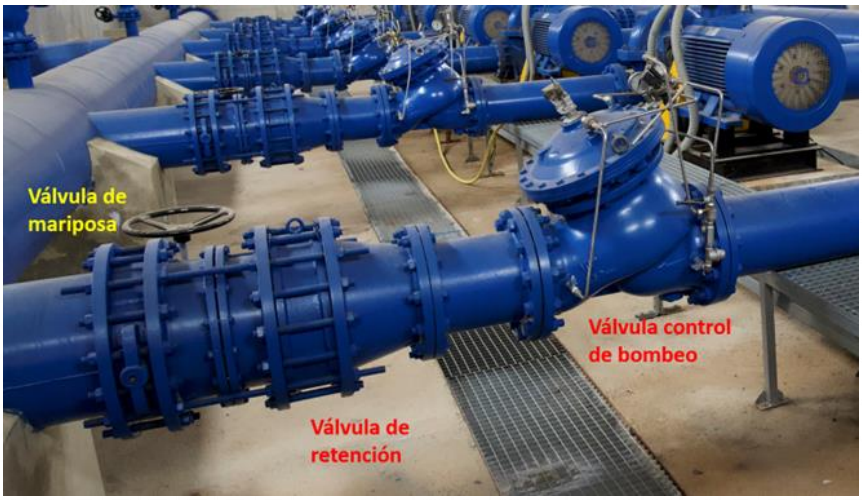


Figura 8. Válvulas instaladas en colector de acero. V. de accionamiento (mariposa), V. de protección (retención) y V. de control de bombeo

Desarrollando las anteriores categorías:

- Maniobra: de accionamiento manual, hidráulico, neumático o eléctrico, todas cumplen la misma función básica: dejar pasar el agua o impedirle el paso. Las más sencillas son aquellas de accionamiento mecánico (compuerta, mariposa y esfera).

- Regulación, control y protección: En redes de riego estas funciones las suelen desempeñar válvulas hidráulicas, de membrana o diafragma, que, dependiendo de las conexiones del piloto hidráulico realizarán una función u otra. Ejemplos de regulación son las reductoras y sostenedoras de presión o las limitadoras de caudal; en la valvulería de control se pueden agrupar las de llenado de depósito, altitud, control de bombeo y las volumétricas; para las de protección se pueden agrupar las de alivio rápido y anticipadoras de onda. Dentro de esta categoría también se pueden incluir las válvulas de retención (que impiden el flujo inverso) o las ventosas, que permiten la entrada y salida de aire en la tubería bajo determinadas circunstancias.

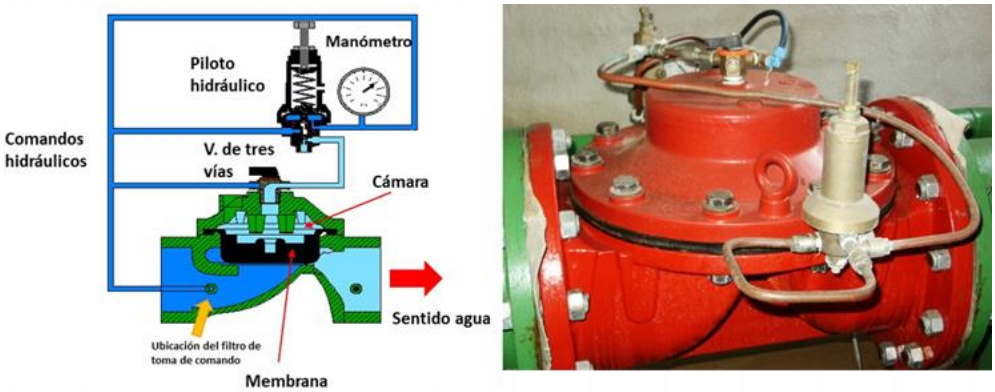


Figura 9. Esquema e imagen de válvula hidráulica de membrana con función de reductora de presión

- Electroválvulas: Constituyen el elemento clave de la automatización en los sistemas de riego a presión. Se trata de un cuerpo de válvula hidráulico sobre el que acciona un solenoide eléctrico. El solenoide se activa mediante cableado eléctrico a sistemas remotos (cable, radio, telefonía, etc.)

Una vez equipada completamente una red, una correcta operación significa minimizar la energía que debe suministrarse bajo un determinado funcionamiento simultaneo de tomas o hidrantes y caudales por tubería. Para una estructura de elementos hidráulicos y tuberías establecida, la flexibilidad de caudales circulantes está restringida por las velocidades del flujo máximas admisibles y la consecución de las presiones necesarias en parcela. De nuevo se proponen algoritmos de decisión para optimizar el consumo energético. Se incluirán en ellos, por ejemplo, las opciones de agrupación y operación de bombas y las alternativas de apertura de hidrantes en un tiempo determinado. Las técnicas de optimización matemática son muy variadas y similares a las usadas en la fase de diseño; la mayoría de ellas requieren apoyarse en el modelo hidráulico de la red (Jiménez-Bello *et al*., 2011).

Sin embargo, cualquier optimización propuesta carecerá de sentido si se descuidan las eficiencias hidráulicas en las operaciones del sistema. Las fugas de agua en la red se pueden producir en la captación y almacenamiento, bombeo, filtración, transporte, derivación en hidrantes, etc. No es fácil su cuantificación, aunque en países desarrollados se estiman entre el 8 y el 24% (Ávila *et al*. 2022). La Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento, indica que el agua no registrada (ANR), es del 23% en agua potable. Esto incluye consumos no autorizados, consumos autorizados no medidos, errores en la medida y perdidas reales que se estiman en un 13% (AEAAS, 2016). En las redes de riego cabe esperar fracciones incluso superiores dadas las condiciones de uso y mantenimiento; la implementación de planes de detección de fugas cobra todo el sentido.

4.1. Modelo hidráulico

Se ha manifestado la necesidad de un modelo hidráulico de la red, que por su complejidad topológica y las variantes en su gestión será de gran ayuda. Dadas las herramientas tecnológicas disponibles, en la fase de diseño ya puede elaborarse el modelo. Luego, en la fase de obra y puesta en marcha deben la caracterizarse e identificar correctamente los elementos finalmente instalados. Un buen modelo, ha de asentarse en un buen inventario, que debe ser actualizado según se modifiquen elementos hidráulicos Los Sistemas de Información Geográfica permiten almacenar esta información espacial, constituyendo otra valiosa herramienta. Existen alternativas para modelizar la red, pero el software más utilizado de simulación es EPANET (Rossman, 2000). Este software, de código abierto y libre distribución, permite realizar simulaciones hidráulicas y de evolución y transporte de sustancias químicas. Adicionalmente el empleo de su "*Toolkit*" desde la mayoría de los entornos de programación permite su adaptación a herramientas más avanzadas de optimización hidráulico/energética de la red. Complementariamente al software de simulación hidráulica, existen aplicaciones que facilitan la construcción de los modelos en el entorno de EPANET a partir de los Sistemas de Información Geográfica. Alguno de ellos son QGISRED (https://github.com/neslerel/QGISRed), GISWATER (http://www.giswater.org/), QWATER (http://www.mikebydhi.com/), WaterCad y WaterGems (www.bentley.com) y QEPANET (https://plugins.qgis.org/plugins/qepanet/).

Una vez construido el modelo y definido el funcionamiento de los componentes, este debe ser calibrado para reproducir fielmente el comportamiento de la red. Los parámetros ajustables del modelo fundamentalmente comprenden los coeficientes de rugosidad o pérdidas localizadas y los diámetros de las tuberías cuando están muy deterioradas, así como los consumos de los nudos cuando son desconocidos. La calibración exige medidas de caudal y presión en diferentes puntos y bajo distintos escenarios de funcionamiento real.

Con un modelo bien calibrado, se pueden verificar desviaciones y problemas sobre la programación prevista, ensayarse diferentes escenarios de riego (reales o futuros) con agrupaciones variables de hidrantes o tomas, testar los tiempos de fertiirrigación, etc. Estos análisis determinarán la capacidad de la red y el sistema de bombeo para suministrar agua a las tomas con el caudal requerido y presión suficiente, contrastando los rendimientos y los consumos energéticos y proponiendo alternativas en la operación de bombas. Del mismo modo que en la calibración, el éxito del uso del modelo durante la fase de explotación, hace necesario un equipo mínimo de medición de presión y caudal en los puntos críticos de la red.

Figura 10. Combinación de modelo hidráulico y SIG

5. Cabezal: filtración y quimigación

Siguiendo el esquema propuesto, al comienzo de la red es habitual ubicar los equipos principales que desempeñen dos operaciones importantes en un sistema de riego a presión, la filtración y la inyección de productos químicos (Figura 11). Normalmente, estos equipos se alojarán en una misma nave o construcción, donde también se encontrarán equipos de automatización y control. Complementariamente, y para acometer todas estas funciones, será preciso que existan elementos complementarios en otros puntos de la red.

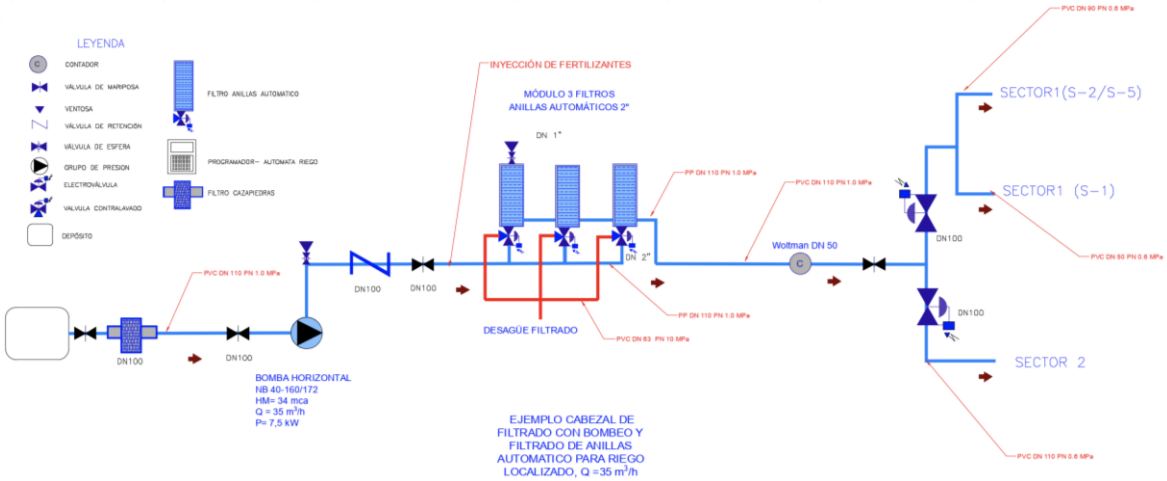


Figura 11. Esquema de cabezal

5.1. Filtración

Los goteros se caracterizan por presentar un diámetro de paso de agua muy estrecho, que debe quedar libre de obturaciones, suelen ser puntos críticos de la instalación; adicionalmente, hay otros elementos a proteger. Un sistema de filtración retendrá aquellas partículas que generan riesgos potenciales o reales para goteros, comandos hidráulicos, válvulas, elementos con partes móviles, etc. Este nivel de protección definirá el "grado de filtración requerido", que se establece en la décima parte de la sección de paso más pequeña que se quiere proteger en la instalación. Existen varias opciones en cuanto a los tipos de filtro, así como variantes en la operación. En la Tabla 3 se presentan las características principales de los filtros más usados.

El sistema de filtración elegido dependerá también del tipo de contaminante, su procedencia y su concentración en el agua. Por tanto, será determinante caracterizar los parámetros físico-químicos tanto en la entrada del sistema de riego como después de la fertirrigación o antes de entrar en la instalación en parcela. En ocasiones la cantidad de elementos en suspensión obligará a la instalación de prefiltrados como se muestra en la Figura 12 (p.e. rejas de desbaste, decantadores o recubrimientos de depósitos).

La mayoría de los sistemas de filtrado requieren una presión mínima para realizar la operación de trabajo adecuadamente. Esta presión varía dependiendo del tipo de filtro, pero siempre es superior a 1 –2 kg/cm^2. No obstante, suele ser la presión mínima requerida para realizar adecuadamente la secuencia de limpieza la que condiciona el funcionamiento del sistema. Ésta, dependiendo del tipo de filtro, suele ser superior a 2 kg/cm^2, llegando a 3 –3,5 kg/cm^2 para determinados tipos. Como alternativa si no se dispone de suficiente presión en el cabezal de filtrado se recurre a sistemas denominados de "agua externa" para garantizar el proceso de

limpieza. Esto supone disponer de equipos independientes de bombeo, solo para garantizar el caudal y presión en la fase de limpieza.

Tabla 3. Tipos y características de los filtros más usados en riego localizado

Tipo filtro	Partículas que retiene	Velocidad de Filtración (100-130 µm)	Pérdidas a filtro limpio	Limpieza del filtro
Hidrociclón	Materia inorgánica de peso específico 1,6 veces mayor que el agua	Velocidad entrada a caudal de diseño entre 2 y 3 m/s	3-5 mca	Limpieza del colector de recogida de impurezas
Filtro de malla	Materia inorgánica y en menor medida materia orgánica	Velocidad a caudal de diseño: • Manual: 200-750 m/h (0,056-0,21 m/s) • AUTOMATICOS:150-600 m/h (0,042-0,17 m/s)	1 – 1,5 mca	Manual o automático, boquillas de succión y válvula de drenaje
Filtro de anilla	Materia inorgánica y en menor medida materia orgánica	Velocidad a caudal de diseño: • Manual: 150-500 m/h (0,042-0,14 m/s) • AUTOMATICOS:130-350 m/h (0,036-0,1 m/s)	1 – 1,5 mca	Manual o automático, contralavado y expansión de las anillas
Filtro de arena o grava	Materia orgánica	Velocidad a caudal de diseño entre 10 y 60 m/h	1 – 1,5 mca	Manual o automático por contralavado

Figura 12. Ejemplos de prefiltración. Decantador (iza.) y rejas (dcha.)

Por otro lado, el filtro limpio se suele seleccionar para que origine una pérdida de carga inferior a 2 m.c.a. Conforme va reteniendo partículas, va incrementando su pérdida de carga, hasta alcanzarse una presión diferencial máxima entre 5 y 6 m.c.a. que indicará que se requiere el lavado del filtro. Si la limpieza es automática, ésta se realizará por contralavado de los filtros, invirtiendo el flujo hasta recuperar la pérdida de carga a filtro limpio (Figura 13).

En los filtros de limpieza manual, se requiere abrir el filtro y limpiar el elemento con agua a presión, cepillos o baños en ácidos. Como se ha evidenciado, el control de la presión resultará determinante en su funcionamiento, pero puede programarse la limpieza también en función

del volumen o el tiempo transcurrido. En la Figura 14 se compara una secuencia de operación y contralavado normal, frente a otra con un desarrollo incorrecto. En ellas se analiza la relación entre la pérdida de carga producida en el filtro frente intervalo de tiempo entre lavados. En el gráfico de la derecha, se observan los instantes de limpieza de los filtros por contralavado, en la secuencia de lavado deficiente, no se consigue devolver el filtro a estado limpio y se acortan progresivamente los intervalos de operación entre lavados, hasta el colapso del filtro.

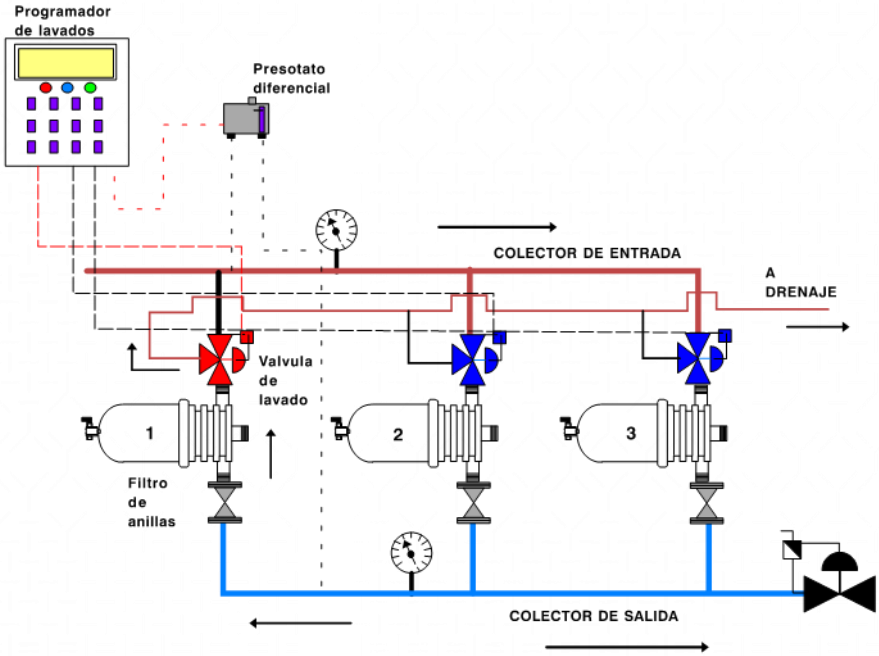


Figura 13. Esquema contralavado filtros de anillas de limpieza automática. Filtro 1 en modo lavado, 2 y 3 en modo filtración

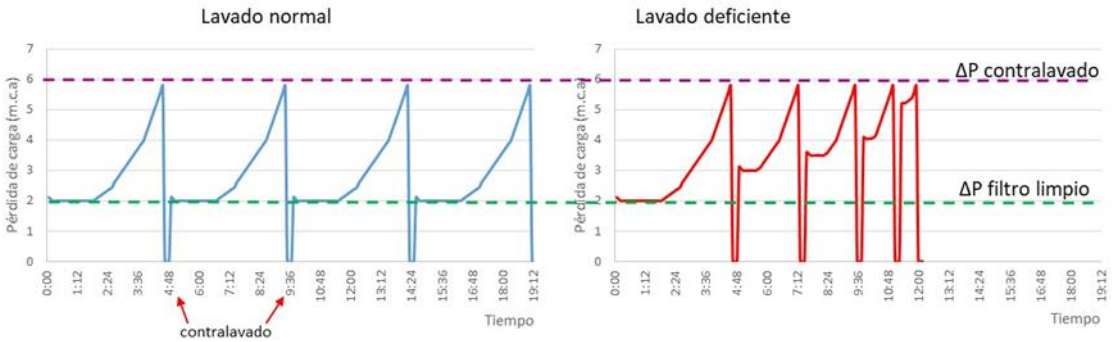


Figura 14. Secuencias de lavado de filtros con funcionamiento normal y deficiente. Relaciones de pérdida de carga y tiempo durante la operación de filtración

5.2. Quimigación

La opción de aportar productos químicos (mayoritariamente fertilizantes) en el agua de riego tiene ventajas interesantes que hace que muchas instalaciones colectivas dispongan de un sistema de inyección. Los componentes básicos serán depósitos, frecuentemente de plástico o de fibra de vidrio, agitadores o soplantes para mantener la dilución, pequeños filtros de mallas, válvulas de seccionamiento y electroválvulas (resistentes al acido) y los inyectores propiamente dichos.

Entre las tecnologías usadas para la inyección, en cabezales, se pueden encontrar tubos Venturi, dosificadoras proporcionales con accionamiento hidráulico o inyectoras eléctricas. Estas últimas pueden ser de tipo volumétrico (habitualmente de pistón o diafragma y peristálticas) o pequeñas bombas centrífugas para realizar una inyección proporcional al caudal de riego.

Figura 15. Tipos de inyectores de fertilizante en cabezales de riego

La forma de integrar estos equipos en la instalación y organizar la fertirrigación es variada y dependerá mucho del grado de automatización y gestión de la red. Si la red funciona a la demanda el caudal de fertilizante inyectado se debe realizar continuo y proporcional al caudal que transporta la red principal. Bajo esta situación, el equipo inyector debe estar compuesto por inyectoras eléctricas, preferiblemente de tipo centrífugo, donde el caudal de solución se ajustará modificando la velocidad de giro de la bomba. Para ello será necesario el empleo de un variador de frecuencia para el motor de la bomba, actuando bajo el emisor de pulsos del contador o el caudalímetro electrónico, situado en la tubería principal de la red de distribución. Si este es el esquema de operación, no se requieren electroválvulas en las distintas tomas de parcela puesto que es el usuario final quien realiza la operación de apertura/cierre.

Si la red distribuye el agua en sectores o turnos fijos (organización rígida) y cada parcela tiene un tiempo de riego (determinado por los gestores de la red), la inyección colectiva se puede programar de forma más racional y fraccionada, repartiendo los tiempos de limpieza y aplicación de cada fertilizante, reduciendo los costes energéticos y de abonado. Sin embargo, como ya se indicó anteriormente, se precisa un grado de automatización mucho mayor, siendo necesario dotar con una electroválvula (al menos) todos los hidrantes multiusuario. Se amplían entonces los tipos de inyectores que se pueden utilizar; aunque para redes comunitarias siempre son más interesantes las inyectoras eléctricas, dando buen resultado aquí las bombas de pistón.

La fertirrigación comunitaria está bien justificada cuando existen monocultivos mayoritarios con necesidades de abonado homogéneas y el tamaño medio de la explotación de cada

propietario/usuario de la comunidad es pequeño, siendo paradigmática la Comunidad Valenciana donde tradicionalmente el tamaño medio de parcela es muy pequeño (menos de 1 ha) y el monocultivo de cítricos es dominante (Ortega-Reig *et al*., 2017).

Sin embargo, la introducción de cultivos diferentes a los cítricos en los sectores de riego o dar un tratamiento particularizado a las distintas variedades, fuera del esquema de monocultivo, implica variaciones en la dosis para las parcelas. Otro cambio importante aparece cuando muchas de las parcelas optan por el cultivo ecológico, lo que requiere el lavado de la red de las sustancias que no sean compatibles (Servicio de Regadíos, 2020). Bajo estos nuevos condicionantes, las opciones de sistemas de riego a la demanda dejan de ser viables para conseguir un correcto reparto de fertilizante, siendo casi obligatorio que el control de los tiempos de riego y fertirriego quede completamente organizado por los gestores de la red y no por los usuarios finales.

El comportamiento de la red de distribución de agua y la evolución del fertilizante hasta cada hidrante ha sido estudiado (Jiménez-Bello *et al*., 2011), analizando cómo la programación de riegos condiciona el tiempo de aplicación de fertilizante en cada parcela. Así, una conclusión interesante de este modelo es que si existen hidrantes/parcelas que no quieren fertirrigación comunitaria es difícil garantizar que no les llegue ninguna cantidad de producto químico, manteniéndose el tiempo de fertilización correcto. Se puede establecer una metodología, por medio del modelo hidráulico, que homogenice los tiempos de riego si hay usuarios que no desean fertirrigación. En este punto existen indicadores para evaluar la eficiencia de la inyección, se puede citar la uniformidad de distribución de fertilizante (DUF), que compara los tiempos de salida de fertilizante en cada toma con el tiempo de riego efectivo. Del mismo modo, y si la red es energéticamente dependiente para presurizarse, se pueden definir estrategias para garantizar distintos tiempos de fertirrigación. En el caso de que la red dependa de la aportación de energía habrá que compatibilizar los objetivos de la eficiencia de la distribución del fertilizante con el consumo energético de los grupos de bombeo, puesto que el punto de funcionamiento óptimo energético no tiene por qué ser el mismo que garantiza la óptima distribución del fertilizante.

El empleo de modelos también permite diseñar una metodología para limpiar la red de fertilizante o hacerlo llegar a todos los puntos de consumo en el menor tiempo posible y minimizando los volúmenes empleados (Jiménez-Bello *et al*., 2021).

Se pueden definir otras medidas complementarias a este manejo de la sectorización y regulación hidráulica de la red. Estas incluyen monitorización por medio de sensores de CE y pH en el cabezal, antes y después de la inyección y en los hidrantes críticos de la red, para vigilar y comprobar la dosificación adecuada del fertilizante. Además, y para la inyección de productos de alto valor añadido y pequeñas concentraciones, es necesario complementar los cabezales principales. Se requieren puntos inyección en lugares estratégicos de la red para reducir los tiempos de recorrido y optimizar la aplicación de los productos (Servicio de Regadíos. DGAGP-GV, 2020).

6. Medición

El conjunto de datos que se pueden registrar y organizar en un sistema de riego es muy amplio, existiendo dos variables hidráulicas, caudal y presión, que deben ser destacados.

La medición del caudal de agua circulante por las tuberías, principalmente al comienzo de la red, y del volumen consumido por los usuarios son parámetros muy valiosos desde el punto de vista de la gestión de sistemas de riego. La mera existencia de la concesión de una dotación de agua condiciona a que exista un "Libro de control de aprovechamiento de aguas de Domino Público" (Orden ARM/1312/2009 2009). Esto obliga que los contadores o caudalímetros estén perfectamente instalados y mantenidos, al menos en los puntos de entrada de agua de la red. Por otro lado, el control del volumen servido en parcela, bien para ajustarlo a las necesidades del cultivo o para facturación, es una operación básica. Si este control es riguroso, se pueden detectar fugas y malos usos de la red.

Generalmente, el volumen total consumido en un determinado periodo de tiempo se puede controlar a nivel de toma mediante contadores mecánicos de turbina (de tecnología de chorro múltiple o Woltman. Si además se quiere registrar el caudal, se pueden usar también medidores de turbina equipados con emisor de pulsos o acudir a medidores electromagnéticos o de ultrasonidos. El caudalímetro se destinará a puntos de medición en tuberías principales, ubicado generalmente en el cabezal, mientras que los contadores serán equipos para la medición en parcela. Dentro de los caudalímetros también se pueden incluir los rotámetros, aunque su uso se limita al control de productos químicos.

Figura 16. Tipos de medidores de caudal: Electromagnético (sup. Izq.), rotámetros (sup. dcha.), contador Woltman (inf. Izq.) y válvula volumétrica (inf. dcha.)

Sin embargo, la precisión y el funcionamiento de estos instrumentos se ve afectado por múltiples parámetros como la calidad del agua, su posición de instalación, su inadecuado dimensionado o su envejecimiento (Arregui y Cabrera, 2007; Madurga y Ramírez, 2011; Palau Estevan *et al*., 2015; Pérez-Perucha *et al*., 2011). Conocer la normativa y las recomendaciones

de instalación puede evitar problemas de infra o sobrecontaje, o incluso de bloqueos de la turbina que pueden originar errores de medición importantes. La (UNE-ISO 16399 2016) y (UNE-EN ISO 4064 2024) fijan los ensayos hidráulicos y de metrología que deben cumplir los contadores nuevos para su certificación y establece las clases de precisión en contadores; Clase 1 y Clase 2. Esta segunda, menos exigente y recomendada en riego. Las normas citadas también contemplan los rangos de medición a través de la ratio dinámico R ($R=Q_3/Q_1$) que es la relación entre Q_3 o caudal permanente y Q_1 o caudal mínimo. Una ratio R mayor, implica una mayor precisión del medidor.

Para la medición de la presión se utilizan mayoritariamente, manómetros, transductores y presostatos. El dispositivo para medir la presión más ampliamente utilizado es el manómetro metálico tipo Bourdon. Basa su funcionamiento en un tubo metálico, aplanado, cerrado por un extremo donde se conecta a la aguja indicadora. El otro extremo del tubo se comunica con el punto del flujo donde se quiere realizar la medición. Estos manómetros se van a encontrar repartidos por múltiples localizaciones (hidrantes, válvulas, filtros, bombas, etc.), siendo muy importantes para controlar la regulación en bombas, válvulas o la limpieza de filtros. Para sistemas automatizados, los manómetros actuarán combinados con presostatos o transductores de presión, que lanzarán la señal para la actuación de variadores de frecuencia, arranque de bombas, contralavado de filtros o apertura y cierre de válvulas. Los transductores de presión son los dispositivos que se emplean para automatizar la medida de la presión, generando una señal eléctrica (tensión o intensidad) que registra el equipo de telecontrol. Los presostatos actúan mediante un sistema mecánico de resorte tipo interruptor, que se activa al alcanzarse una determinada presión, por encima o por debajo de un valor de tarado.

7. Automatización

Como sistema de automatización se puede entender como todo el conjunto de tecnologías y elementos computarizados, que organizados y jerarquizados controlarán equipos y procesos, en una red de riego. Puede ser solo de telemedida (p.e. recogida de volúmenes de contadores), telemando (donde además se actúa a distancia sobre electroválvulas) o telegestión que incluye las dos funciones anteriores, más la planificación y el control automático, tras el procesado de la información recibida. Queda implícito que estas operaciones tienen que hacerse a distancia, requiriéndose un sistema de transmisión de la información mediante técnicas de telecomunicaciones. Podremos encontrar en este sistema sensores (humedad de suelo, climáticos, caudal, presión, etc.), controladores, relés y actuadores (electroválvulas), elementos de comunicación (servidores, unidades remotas, interfaces de monitoreo, etc.) pero también software de análisis y control del sistema.

El alcance de la automatización puede responder a distintos objetivos y se adaptará a lo que requiere cada instalación y usuario. Hay explotaciones que solo requieren controlar algunas funciones de limpieza de filtros en el cabezal o se limitan a la lectura a automática de contadores, pudiéndose llegar hasta los sistemas SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*, Supervisión, Control y Adquisición de Datos) que telegestionan integralmente la explotación. Estos últimos son capaces, en tiempo real, de registrar todas las variables hidráulicas del

sistema, admiten la información de sensores, estaciones climáticas, etc. Por otro lado, permiten controlar la apertura y cierre de electroválvulas, arranque de bombas, nivel de depósitos, etc.

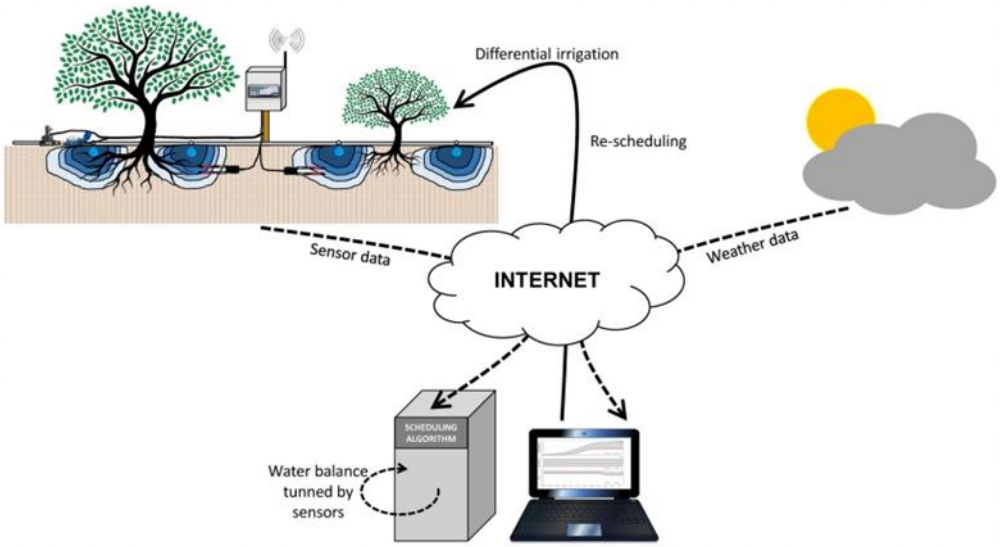


Figura 17. Esquema de sistema de telegestión de riego (Domínguez-Niño *et al*., 2020)

Si, como se introdujo en el punto 4.1, existe un modelo hidráulico calibrado, se puede vincular al SCADA. Su capacidad permite la adquisición de los datos necesarios de consumos y presiones para mantener actualizado el modelo en casi tiempo real y reproducir el comportamiento, simulando las programaciones de riego establecidas y ajustando el riego de precisión (Campos *et al.*, 2020). Esta descrita, sería una versión "hidráulica" de un sistema de soporte a la toma de decisiones o DSS por sus siglas en inglés (*Decision Support System*). En una definición sencilla, se puede decir que un DSS es un programa informático que implementan herramientas o modelos para recopilar información útil para identificar problemas. Tras procesar la información van a ayudar en la toma de decisiones para la resolución de esos problemas. La información puede registrarse manualmente por la observación y conocimiento del usuario o automáticamente desde todo tipo de sensores, para ser utilizada en los modelos de simulación que además pueden ser corregidos en tiempo real. Un DSS puede ser de orientación solo hidráulica; sin embargo, hay ejemplos para realizar recomendaciones de riego y optimizar el manejo de este, para la fertilización y el manejo de nutrientes o para la prevención de plagas y enfermedades. Existen tanto DSS genéricos como otros desarrollados para cultivos específicos en condiciones particulares (Zhai *et al*., 2020).

Por último, se pueden encontrar plataformas digitales para la gestión agrícola, donde se integran sistemas SCADA, DSS, y bases de datos en SIG. Los gestores o técnicos de la red de riego, pero también los usuarios finales tienen la posibilidad de acceder a la información de su explotación y (según los niveles de gestión definidos) actuar sobre los distintos elementos.

Obviamente, según lo que se pretenda realizar en la automatización, Los componentes físicos y el software admiten muchas variantes. Comenzando por electroválvulas individuales comandadas por un temporizador; pasando por programadores con un número limitado de salidas y entradas independientes; hasta llegar a complejas estructuras informáticas. En estas últimas se puede establecer comunicación desde los elementos de campo a teléfonos móviles, y con capacidad de actuar sobre cualquier elemento físico susceptible de emitir o recibir una señal eléctrica.

Debe remarcarse que la automatización supone numerosas ventajas en la gestión, operación y mantenimiento de un sistema. Muchas tareas se liberan del factor humano, se estandarizan y se reduce la posibilidad de fallos y está muy contrastada por la experiencia, no solo el ahorro de mano de obra, sino también de agua y energía. Por otro lado, la tecnología está madura para poder aplicar un verdadero "riego de precisión". Sin embargo, resulta evidente que el sistema hidráulico tiene que estar bien definido y adaptado para que la automatización se efectiva en su máximo potencial, más aún si hay un DSS.

8. Bombeo y suministros energéticos

Como se ha comentado, van a ser pocas las redes que cuentan con la ventaja de tener el punto de suministro a cota suficientemente elevada, que ya garantice la presión. Bien desde la captación de un sondeo a una balsa de cabecera, por medio de un grupo buzo, o con la reimpulsión tras una captación superficial o una balsa, aparecerán bombas para presurizar la red. Recordamos que esta presurización será necesaria tanto para el transporte, como para el correcto funcionamiento de los goteros o emisores de riego. De nuevo el catálogo de tipos de bombas en amplísimo, las necesidades de caudal y altura, potencia, uso y características específicas de la instalación condicionarán su selección. En todo caso se trata de máquinas rotodinámicas, donde los elementos impulsores (rodetes) son accionados por el eje de un motor. Hay por tanto un traslado de potencia mecánica desde el motor a potencia hidráulica a las tuberías. El motor necesitará energía eléctrica para su funcionamiento, siendo estos los grandes consumidores de electricidad en toda la instalación de riego.

La bomba y el motor eléctrico, configurando el grupo de impulsión y como cualquier otra máquina, no pueden transformar en potencia útil hidráulica toda la potencia eléctrica que están absorbiendo. No solo se ha de conocer la relación entre la presión y caudal suministrado (curva Altura-Caudal), también el rendimiento que relaciona estas potencias. Este rendimiento, por otro lado, no es constante; como se observa en la Figura 18, para una bomba, existe un caudal para el que se alcanza el rendimiento máximo, lo que supone el mejor aprovechamiento de la energía eléctrica absorbida.

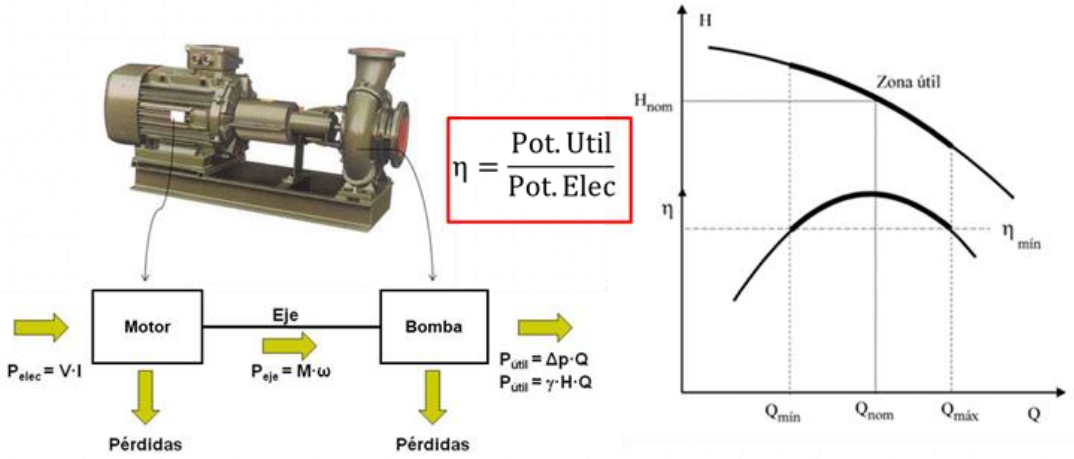


Figura 18. Balance energético en un grupo moto-bomba (izda.). Curvas Altura-Caudal (H-Q) y rendimiento-Caudal (η-Q) de una bomba (dcha.)

Tanto en el diseño de la red de distribución, como en su posterior gestión, los puntos de funcionamiento reales deben situarse lo más próximos posibles a los rendimientos máximos y en cualquier caso en lo que se conoce como zona útil de la bomba, que está definida por aquella donde los rendimientos se sitúan próximos al máximo.

Si se sigue una gestión convencional, pero aún más si ha de aplicarse un riego de precisión, la red tendrá que adaptarse a distintos puntos de funcionamiento y debe existir suficiente capacidad de regulación en el sistema de bombeo. Para lograr una buena capacidad de regulación, existen soluciones técnicas que permiten mantener siempre elevados los rendimientos; pasan por que exista la posibilidad de acoplar bombas en paralelo y la operación de variadores de frecuencia. El variador de frecuencia controla la velocidad del motor de la bomba ajustando la frecuencia de alimentación eléctrica del motor. Al variar la frecuencia, se puede controlar la velocidad del motor de forma continua y de esta forma adaptar y desplazar (dentro de unos límites) las curvas de las bombas. La automatización de la regulación se consigue mediante la inclusión del bombeo en los programadores de riego, con la correspondiente integración en el programador de señales procedentes transductores o caudalímetros.

La fuente de suministro eléctrico para los equipos de bombeo es un factor que debe tenerse en cuenta desde el inicio del diseño de la red. Como se dijo en el inicio del capítulo, es determinante conocer las posibilidades de suministro eléctrico o aplicación de energías renovables para definir el funcionamiento de la red. Si el suministro se produce directamente de la red eléctrica, se deberán considerar los costes asociados al mismo. En el caso de las potencias utilizadas en regadío, en el momento actual, la tarifa eléctrica que suele utilizarse es las 6.1TD. Esta tarifa se contrata para potencias superiores a los 15 kW. Esta tarifa existe desde el 1 de junio de 2021 y sus principales características son que está dividida en seis términos de potencia y seis términos de energía, la tensión de suministro oscila entre 1 kV y 30 kV. La distribución anual de los periodos es la que se muestra a continuación:

Tabla 4. Distribución periodos tarificación eléctrica Tarifa 6.1TD zona peninsular.

	Meses (Horario de Lunes a Viernes)												Todos los meses. Fin de semana y festivos	
Horas día	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Sábados	Domingo
0:00- 8:00	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6	P6
8:00-9:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6	P6
9:00-10:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
10:00-11:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
11:00-12:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
12:00-13:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
13:00-14:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
14:00-15:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6	P6
15:00-16:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6	P6
16:00-17:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6	P6
17:00-18:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6	P6
18:00-19:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
19:00-20:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
20:00-21:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
21:00-22:00	P1	P1	P2	P4	P4	P3	P1	P3	P3	P4	P2	P1	P6	P6
22:00-23:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6	P6
23:00-0:00	P2	P2	P3	P5	P5	P4	P2	P4	P4	P5	P3	P2	P6	P6

El periodo P6 es el más económico tanto el término de potencia como el de energía. Por ello, las horas disponibles en este periodo deben considerarse en el diseño y operación de una red y sus turnos, para aprovecharlas y obtener una amortización mayor de la red.

La llegada de energías renovables al mundo del regadío cambia la organización del riego respecto a la considerada cuando solo existe energía de la red. Con un sistema de alimentación de energía solar fotovoltaica, se deben aprovechar las horas de mayor radiación del día, por lo que los hábitos de riego deben ser totalmente diferentes.

Lo más común en la actualidad es alimentar mediante parques solares fotovoltaicos (PSF) estaciones de bombeo existentes que están alimentadas con energía procedente de la red eléctrica. En estos casos, lo más común es hacer sistemas híbridos donde los equipos de bombeo pueden funcionar indistintamente con energía de la red o procedente del PSF.

Cuando se trata de estos sistemas híbridos la instalación se debe acompañar de un sistema de gestión inteligente que permita optimizar la energía procedente del PSF y, en los momentos de baja radiación, decidir si se debe de tomar energía de la red o no según el periodo en el que nos encontremos.

Para dicha optimización, de nuevo, es fundamental el uso de variadores de frecuencia. Con ellos, es posible adaptar la curva de los equipos de bombeo para que en el caso de que la potencia consumida por el parque no esté disponible en el PSF, bajar la frecuencia en el motor y adaptarla a la energía disponible en esos momentos, evitando así tomar energía de la red. Este caso es común en el momento en el que tenemos periodos nublados. Con esto también, evitamos que el número de paradas y arranques de la bomba sea superior al recomendado y pueda poner en compromiso su integridad.

Dadas las potencias de equipos de bombeo que se dan en el riego colectivo de comunidades de regantes (superiores a 100 kW), los PSF deben ir acompañados de sistemas antivertido. Según el Real Decreto 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica las instalaciones de más de 100 kW deben disponer de un sistema antivertido que no permitan verter los excedentes producidos a la red. Este sistema limita la producción de los inversores adecuándola a la demanda, cuando el PSF produce más, evitando así que la energía sobrante se vierte a la red.

Dándole la vuelta al problema del suministro eléctrico, en los últimos tiempos se están planteando opciones de recuperación de energía en redes de riego (Pérez-Sánchez *et al*., 2018; Pérez-Sánchez *et al*., 2021). Esta opción se considera mediante la inclusión de miniturbinajes en aquellos lugares donde existe exceso de presión; se plantea su resolución de forma práctica con PATs (*Pumps as Turbines*), bombas a las que se hace girar el rodete en sentido contrario y se conecta un generador eléctrico en vez de un motor. Ya se explicó la necesidad de reducir la presión en aquellos puntos donde es excesiva, particularmente en los hidrantes; si la válvula reductora de presión que realiza esta función se sustituye por una PAT la energía es potencialmente recuperable. En la Figura 19 se presenta un esquema de una red alimentada por gravedad que dispone de una energía determinada al inicio (E_T); en ella existen zonas a cota baja, que tienen exceso de presión. La energía teórica necesaria (E_{TN}) es la menor energía posible para cumplir los requisitos locales de presión mínima en el punto menos favorable de la red; esta se va a descomponer en la energía requerida para el suministro correcto garantizando los

requisitos locales de presión mínima (E_{RI}) y es la energía disponible para la recuperación en un punto analizado (E_{TA}). Teóricamente, en cualquier red, existirán numerosas líneas donde existe energía recuperable. Determinar la ubicación de las PATs para que sea rentable su instalación, así como su posible regulación es complicado, pero no cabe duda de que son una alternativa interesante.

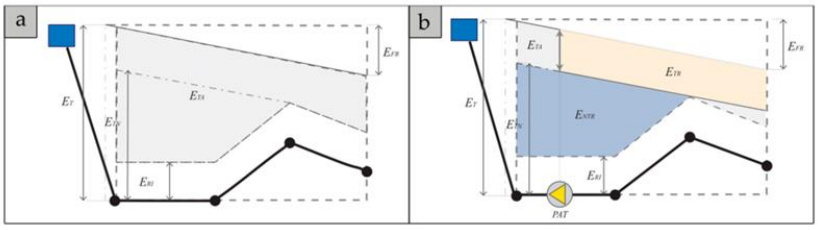


Figura 19. Sistema de distribución de agua sin gestión de la presión (a). Sistema de distribución de agua con PATs instalados (b). (Camilo Rosado *et al*., 2020)

9. Mantenimiento y auditoría

Tras la descripción de la instalación y revisar su manejo para lograr un uso de agua y energía, resulta evidente la gran variedad de componentes que la integran. Para su buen aprovechamiento, una instalación moderna dotada de un alto grado de tecnificación va a requerir tres actividades complementarias: evaluación/auditoria del funcionamiento, mantenimiento de las instalaciones y formación de los técnicos. Cuestiones como la aplicación de la dosis justa de agua en parcela, la minimización de las fugas, el reparto adecuado de los caudales en la red, el suministro ajustado de presión o la adecuación de los rendimientos en los bombeos, dependen de un buen diseño y manejo de las tecnologías de riego empleadas. Para que todo funcione según lo previsto, y a modo de conclusión, se recuerdan estos aspectos que se consideran críticos para el éxito y durabilidad de la instalación de riego.

En sistemas de distribución de agua potable se viene incorporando procedimientos de “Auditoria y mejora del rendimiento hidráulico-energético”, “Programas de control de pérdidas de agua y mejora de la calidad del suministro” o existen “Planes de explotación y mantenimiento” (Cabrera *et al*., 2011). Dado que los costes energéticos convencionales pueden llegar hasta más de tres cuartas partes de los de la instalación, el sector de riego necesita conseguir la mejor eficiencia posible. El Instituto para la Diversificación y Ahorro Energético (IDAE), dependiente del Ministerio de Industria, debido a la alta dependencia y consumo energético del sector, tiene establecido un protocolo de Auditoria Energética para redes de riego (ESYRCE, 2014; FENACORE, 2017). Desde diferentes instituciones también se han definido indicadores que contemplan la sostenibilidad hídrica, energética, ambiental y económica (Servicio de Regadíos. DGAGP-GV, 2021); y hasta se ha cuantificado la huella hídrica de las técnicas de riego (Chukalla *et al*., 2015). Realizar auditorías y evaluaciones periódicas en las instalaciones de riego es crucial para la agricultura moderna, ya que permite identificar ineficiencias y optimizar el uso de recursos (Pardo Picazo *et al*., 2013). Ayudan a minimizar la huella de agua al asegurar que cada gota se use de manera efectiva y también reducen la huella de carbono al mejorar la eficiencia energética de los sistemas de riego.

Sin embargo, en el día a día de las explotaciones y más allá de la eficiencia de los bombeos, aún queda recorrido en el análisis y mantenimiento de las instalaciones. Es incluso discutible si para pequeñas redes, protocolos muy sofisticados estarían justificados. Sin embargo, los gestores de cualquier instalación deberían establecer unas pautas mínimas y suficientes de mantenimientos planificados (predictivo/preventivo). También debería estar claros y lo más optimizado posible los procedimientos de reparaciones tras averías o roturas, este es el mantenimiento correctivo. Este mantenimiento involucra tiempos que pueden comprometer la disponibilidad de un elemento: tiempos de respuesta, acopio de repuestos y disponibilidad de operarios y la reparación propiamente dicha.

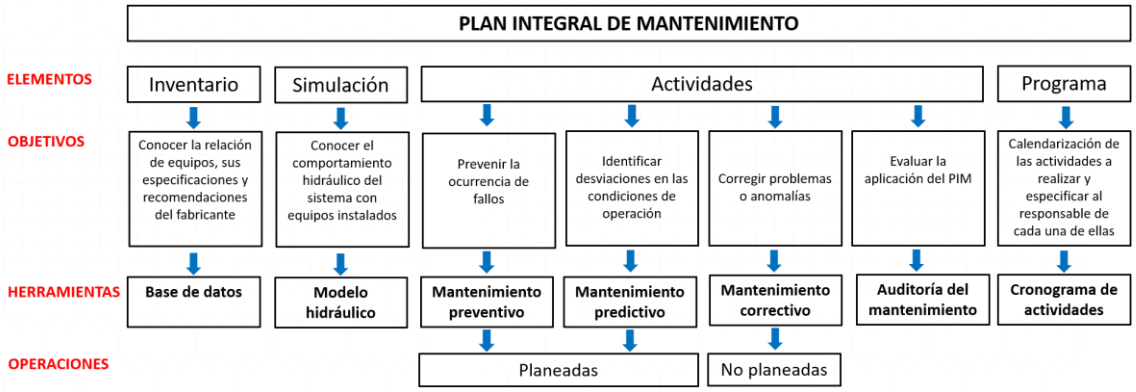


Figura 20. Estructura de un plan de mantenimiento (Adaptado de Pedraza y Rosas, 2011)

En forma general, debemos aceptar que la realización de un mantenimiento ajustado a un plan previo y con una sistemática de trabajo, será más económico que un mantenimiento correctivo, esta es una lección aprendida de otros sectores de actividad económica y contrastado en redes de distribución de agua potable. Dada la casuística y particularidades de cada red, es difícil establecer ratios claros, pero generalmente se considera adecuada una relación anual de un 80% en gastos preventivos y un 20% en correctivos. Por otro lado, las tareas correctivas en caso de producirse en unos periodos críticos de riego, puede comprometer el estado hídrico de los cultivos. adicionalmente un mal mantenimiento del sistema de bombeo acarrea una perdida en los rendimientos (Figura 21) o el aumento de las pérdidas de carga durante el reparto del agua; lo cual redunda en mayores consumos energéticos.

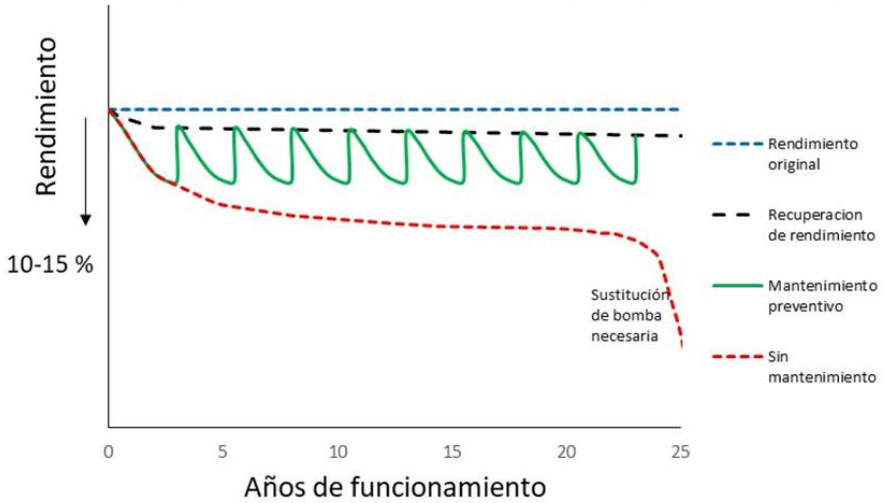


Figura 21. Evolución del rendimiento en bombas con y sin mantenimiento (Adaptado de ETSU *et al.,* 2001)

Por último, considerando que el esfuerzo inversor por modernizar las instalaciones ha sido muy importante, sería lógico un esfuerzo equivalente para cualificar a los gestores y operarios de la red. Es inherente la formación agronómica, pero en riego a presión se requieren conocimientos de hidráulica, y también electricidad, electrónica, comunicaciones, resistencia de materiales, etc. Con este abanico, es habitual que muchas tareas se subcontraten, pero el personal que maneja las instalaciones debe tener un conocimiento robusto del funcionamiento del sistema y las tareas a realizar. Los planes de formación deberían ser rutinarios para el personal de instalaciones mínimamente tecnificadas.

En un escenario donde la conservación de recursos es primordial, el consumo de tiempo y dinero en estos planes de evaluación, mantenimiento y formación, está plenamente justificado. En el contexto del "riego inteligente", este solo podrá serlo si se garantizan prácticas más responsables y respetuosas con el medio ambiente, asegurando la sostenibilidad de la agricultura de regadío

Bibliografía

Abadía, R.; Rocamora, C.; Ruiz, A.; Puerto. H. (2008). Energy Efficiency in Irrigation Distribution Networks I: Theory. Biosystems Engineering, 101(1): 21–27.

AEN/CTN68 UNE-EN 14267 (2005). Técnicas de Riego. Hidrantes Para Riego.

Arregui, F.; Cabrera, E.; Cobacho, R. (2007). Gestión Integral de Contadores de Agua. Valencia: IWA Publishing. Monografías ITA-UPV.

Arviza-Valverde, J. (2017). Diseño y Dimensional de La Red de Transporte En Un Sistema de Riego Localizado. Datos de Partida, Topología y Trazado. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

Arviza Valverde, J. (1996). Riego Localizado. Valencia: Servicio de Publicaciones Universidad Politécnica de Valencia.

Asociación Española de Abastecimiento de Agua y Saneamiento-AEAS (2016). Suministro de Agua Potable y Saneamiento en España. XIV Estudio Nacional.

Ávila, C.; Macías, A.; Sánchez-Romero, F.J.; López-Jiménez, P.A.; Pérez-Sánchez, M. (2022). Improve Leakage Management to Reach Sustainable Water Supply Networks through by Green Energy Systems. Optimized Case Study. Sustainable Cities and Society, 83: 103994.

Balbastre-Peralta, I.; Arviza-Valverde, J.; Palau, C.V.; González-Pavón, C.; Manzano-Juárez, J., (2021). Multioutlet Hydrants in Mediterranean Pressurized Irrigation Networks: Operation Problems and Hydraulic Characterization. Agronomy, 11(11): 2240.

Bralts, V. F.; Edwards, D. M.; Wu, I.P. (1987). Drip Irrigation Design and Evaluation Based on the Statistical Uniformity Concept. Advances in Irrigation, 4: 67–117.

Bralts, V.F.; Wu.; I.P.; Gitlin, H.M. (1981). Drip Irrigation Uniformity Considering Emitter Plugging. Transactions of the ASAE,24(5): 1234–40.

Cabrera Jr, E.; Dane, P.; Haskins, S.; Theuretzbacher-Fritz, H. (2011). Benchmarking Water Services. London: IWA Publishing.

Camilo Rosado, L.E.; López-Jiménez, P.A.; Sánchez-Romero, F.J.; Conejos Fuertes, P.; Pérez-Sanchez, M. (2020). Applied Strategy to Characterize the Energy Improvement Using PATs in a Water Supply System. Water, 12(6): 1818.

Campos, J; Alonso, C.; Jiménez-Bello M. A.; Martínez Alzamora, F. (2020). Real-Time Energy Optimization of Irrigation Scheduling by Parallel Multi-Objective Genetic Algorithms. Agricultural Water Management, 227: 105857.

Chukalla, A. D.; Krol M.S.; Hoekstra, A.Y. (2015). Green and Blue Water Footprint Reduction in Irrigated Agriculture: Effect of Irrigation Techniques, Irrigation Strategies and Mulchin'. Hydrology and earth system sciences, 19(12): 4877–91.

Domínguez-Niño, J.M; Oliver-Manera, J.; Girona, J.; Casadesús, J. (2020). Differential Irrigation Scheduling by an Automated Algorithm of Water Balance Tuned by Capacitance-Type Soil Moisture Sensors. Agricultural Water Management, 228: 105880.

ESYRCE (2014). Encuesta Sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/esyrce/default.aspx. Acceso: 30 April 2024

ETSU; CETIM; Reeves, D.T.; NESA. (2001). Study on Improving the Energy Efficiency of Pumps, Brüssel: European Commission.

FENACORE. (2017). Dossier de Prensa. Federación Nacional de Comunidades de Regantes. Dossier de Prensa. Federación Nacional de Comunidades de Regantes.

Fernández-Pacheco, D.G.; Ferrández-Villena, M.; Molina-Martínez, J.M.; Ruiz-Canales, A. (2015). Performance Indicators to Assess the Implementation of Automation in Water User Associations: A Case Study in Southeast Spain. Agricultural Water Management, 151: 87–92.

Juana, L.; Sánchez, R.; (2024). Nexo agua-energía-soluciones técnicas a problemas técnicos. En: J. Lamo de Espinosa; A. Garrido (Coords.), Regadío y Seguridad Alimentaria: La Situación en España. Cajamar Caja Rural

González-Pavón, C.; Arviza-Valverde, J.; Balbastre-Peralta, I.; Carot Sirerra J.M.; Palau-Salvador, G.; (2020). Are Water User Associations Prepared for a Second-Generation Modernization? The Case of the Valencian Community (Spain). Water, 12(8): 2136.

Horst, L. (1998). The Dilemmas of Water Division: Considerations and Criteria for Irrigation System Design. Colombo (Sri Lanka): International Water Management Institute.

Jiménez-Bello, M. A. (2008). Integración de los Procesos Agronómicos e Hidráulicos del Riego a Presión en un Entorno SIG para la Gestión Eficiente de Comunidades de Regantes. Valencia: Universitat Politècnica de València.

Jiménez-Bello, M.A.; Alonso Campos J.C.; Manzano-Juárez, J.; Martínez Alzamora, F. (2021). Methodology for Flushing Pressurised Irrigation Networks for Fertigation and Operation Maintenance Purposes. Irrigation Science, 39: 375–84.

Jiménez-Bello, M.A.; Martínez Alzamora, F.; Castel, J.R; Intrigliolo, D.S. (2011). Validation of a Methodology for Grouping Intakes of Pressurized Irrigation Networks into Sectors to Minimize Energy Consumption. Agricultural Water Management, 102(1): 46–53.

Keller, J.; Karmeli, D. (1974). Trickle Irrigation Design Parameters. Transactions of American Society of Agricultural Engineers, 17: 678-684.

Lapo, C.M.; Pérez-García, R.; Aliod-Sebastián, R.; Martínez-Solano, F.J. (2020). Diseño óptimo de redes de riego a turnos y caracterización de su flexibilidad. Tecnología y Ciencias del Agua, 11(1): 266–314.

Madurga, C.; Ramírez, J. (2011). Influencia de la Calidad del Agua en la Metrología de Contadores de Riego'. In XXIX Congreso Nacional de Riegos (Córdoba), 151–52.

Martínez-Gimeno, M.A.; Bonet, L.; Provenzano, G.; Badal, E.; Intrigliolo, D.S.; Ballester, C. (2018). Assessment of Yield and Water Productivity of Clementine Trees under Surface and Subsurface Drip Irrigation. Agricultural water management, 206: 209–16.

Moreno, M.A.; Córcoles, J.I.; Tarjuelo, J.M.; Ortega, J.F. (2010). Energy Efficiency of Pressurised Irrigation Networks Managed On-Demand and under a Rotation Schedule'. Biosystems Engineering, 107(4): 349–63.

Orden ARM/1312/2009, de 20 de mayo, por la que se regulan los sistemas para realizar el control efectivo de los volúmenes de agua utilizados por los aprovechamientos de agua del dominio público hidráulico, de los retornos al citado dominio público hidráulico y de los vertidos al mismo. BOE-A-2009-8731

Ortega Reig, M.V.; Sanchis Ibor, C.A.; Palau Salvador, G.; García Molla, M.; Avellá Reus, L.F. (2017). Institutional and management implications of drip irrigation introduction in collective irrigation systems in Spain. Agricultural Water Management, 187:164-172.

Palau Estevan, C.V.; Balbastre Peralta, I.; Arviza Valverde, J.; Sanchis Alós, L.H. (2015). Bloqueo de contadores de chorro múltiple en hidrantes multiusuario para riego. In XXXIII Congreso Nacional de Riegos. Valencia: Editorial Universitat Politècnica de València.

Pardo Picazo, M.A; Manzano, J.; Cabrera, E.; García-Serra, J. (2013). Energy Audit of Irrigation Networks. Biosystems Engineering, 115(1):89-101

Pedraza, A.; Rosas, R. (2011). 'Evaluación para Sistemas de Bombeo de Agua: Manual de Mantenimiento. Washington, D.C.: Iniciativa de Agua y Saneamiento. Iniciativa de Energía Sostenible y Cambio Climático.

Pérez-Perucha, J.; Madurga C.; Sánchez de Ribera, A. (2011). Influencia de la Disposición de un Contador en su Metrología. In XXIX Congreso Nacional de Riegos. Córdoba, 149–50.

Pérez-Sánchez, M.; Fernandes, J.F.P.; Branco, P.J.C.; López-Jiménez, P.A.; Ramos, H.M. (2021). PATs Behavior in Pressurized Irrigation Hydrants towards Sustainability. Water, 13(10): 1359.

Pérez-Sánchez, M.; López-Jiménez, P.A.; Ramos, H.M. (2018). PATs Operating in Water Networks under Unsteady Flow Conditions: Control Valve Manoeuvre and Overspeed Effect. Water, 10(4): 529.

Chris, P.; Steduto, P.; Allen, R.G.; Burt, C.M. (2009). Increasing Productivity in Irrigated Agriculture: Agronomic Constraints and Hydrological Realities. Agricultural Water Management, 96(11): 1517–24.

Playán, E.; Mateos, L. (2006). Modernization and Optimization of Irrigation Systems to Increase Water Productivity. Agricultural Water Management, 80(1–3): 100–116.

Rossman, L A. (2000). EPANET Programmer's Toolkit, Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory. US Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH.

Sanchis-Ibor, C.; Ortega-Reig, M.; Guillem-García, A.; Carricondo, J.M.; Manzano-Juárez, J.; García-Mollá, M.; Royuela, A. (2021). Irrigation Post-Modernization. Farmers Envisioning Irrigation Policy in the Region of Valencia (Spain). Agriculture, 11(4): 317.

Servicio de Regadíos. Dirección General de Agricultura Ganadería y Pesca. Conselleria de Agricultura Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica (2021). Calculo de Los Indicadores de la Estrategia Valencia de Regadíos 2020-2040. https://portalagrari.gva.es/es/agricultura/estrategia-valenciana-regadius-2020-2040. Acceso: 23 April 2024

Servicio de Regadíos. Dirección General de Agricultura Ganadería y Pesca. Conselleria de Agricultura Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica. (2020). Guía metodológica para la compatibilización de la fertirrigación comunitaria con la agricultura ecológica y el policultivo y para su empleo hacia una producción ecológica comunitaria. Valencia: Generalitat Valenciana.

UNE-EN ISO 4064 (2024). Contadores de Agua para Agua Fría Potable y Agua Caliente.

UNE-EN ISO 9261 (2010). Equipos de Riego. Emisores y Tuberías Emisoras. Especificaciones y Métodos de Ensayo.

UNE-ISO 16399. (2016). Contadores de Agua Para Riego.

Zhaoyu, Z.; Martínez. J.F.; Beltrán, V.; Martínez, N.L. (2020). Decision Support Systems for Agriculture 4.0: Survey and Challenge'. Computers and Electronics in Agriculture, 170: 105256

Optimizando el Futuro Agrícola: Tecnología WiseConn para un Uso Sustentable del Agua

La agricultura desempeña un papel crucial en la alimentación global, pero la escasez de agua y los desafíos ambientales demandan una gestión eficiente de recursos, donde la innovación tecnológica se presenta como una herramienta esencial. En este contexto, WISECONN se destaca como uno de los principales desarrolladores de tecnología para la automatización y monitorización del riego y la fertilización, con 18 años de experiencia en el sector.

WiseConn ha creado soluciones integrales de hardware y software bajo su plataforma 100% en la nube, Dropcontrol, diseñada para simplificar la gestión agrícola en un contexto donde el agua es cada vez más escasa y vital. Mediante sensores estratégicamente ubicados, esta tecnología recopila datos en tiempo real sobre la humedad del suelo, las condiciones climáticas y otros parámetros relevantes, permitiendo a los agricultores tomar decisiones informadas sobre el riego de manera eficiente. Un aspecto clave es la capacidad de Dropcontrol para integrarse con una amplia gama de desarrolladores de software y asesores agronómicos, facilitando la creación de un ecosistema de soluciones que comparten el objetivo de mejorar la gestión del agua en la agricultura.

Entre los beneficios destacados de esta tecnología se encuentra su capacidad para optimizar el uso del agua y otros recursos, lo que resulta en un aumento de la productividad agrícola y una mejora en la rentabilidad del negocio. Además, contribuye a la sostenibilidad ambiental al reducir la escorrentía de agua y la lixiviación de nutrientes.

WiseConn ha instalado más de 18 mil dispositivos en diversos países, controlando y monitorizando más de 300 mil hectáreas, lo que evidencia su impacto positivo en la rentabilidad y sostenibilidad agrícola. Clientes han reportado aumentos significativos en el rendimiento, como un 15% en la producción de melocotones industriales, gracias a una gestión más precisa del riego y la fertilización.

La tecnología ha generado ahorros significativos de agua y un aumento del 10% en el rendimiento de cultivos. Sin embargo, es esencial que los agricultores integren y normalicen su uso dentro de la cultura organizacional para maximizar sus beneficios.

En conclusión, el uso sostenible del agua en la agricultura se ha convertido en una prioridad global, desafiando a los agricultores a combinar rentabilidad con eficiencia en el uso de recursos. Empresas innovadoras como WiseConn están liderando este cambio hacia un futuro agrícola más verde y sostenible, donde la implementación de tecnologías como DropControl demuestra claramente los beneficios tangibles que pueden obtenerse.

Contacto

WiseConn
Avenida de la Industria 38, Nave a17,
Coslada, Madrid, CP 28823
Tel. +34 625 46 78 55
info@wiseconn.es
https://wiseconn.es/

WiseConn®

RIEGUE CON PRECISIÓN

PLATAFORMA DE GESTIÓN **INTEGRAL DEL AGUA**

APP

DropControl®

Aplicación Móvil y de Escritorio

SERVIDORES

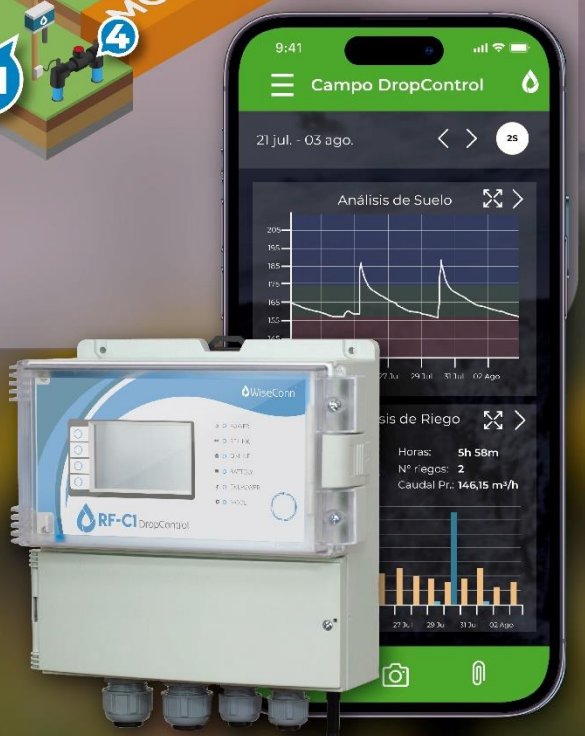
WiseConn®

Servicio Basado en Amazon Web Services

Integración por API a múltiples plataformas y sensores

API

1. POZO
2. CANAL
3. FERTIRRIEGO
4. VÁLVULA
5. SENSOR HUMEDAD DE SUELO
6. ESTACION METEREOLÓGICA
7. IMÁGENES SATELITALES



- CONTROL DE EXTRACCIÓN DE POZOS
- MONITOREO Y CONTROL DE FERTIRRIEGO AVANZADO
- MONITOREO DE HUMEDAD DE SUELO, CLIMA Y PLANTA
- CAUDAL DE VÁLVULAS MAESTRAS, CANALES Y VOLUMEN ACUMULADO DE RESERVORIOS
- CONTROL INALAMBRICO DE VÁLVULAS, BOMBAS E IMPULSIONES
- IMÁGENES SATELITALES

WWW.WISECONN.ES INFO@WISECONN.ES +34 625467855

AQUA-TRAXX

FLOWCONTROL

Aqua-TraXX® es la cinta de riego por goteo con las mejores prestaciones del mercado.
– Extraordinaria eficiencia
– Resistencia a la obturación
– Amplia gama de soluciones con caudales bajos y distancias entre goteros muy reducidas

FlowControl es la única cinta de riego por goteo que garantiza una uniformidad de distribución.
– Perfecto para regar hortícolas
– Posibilidad de haber líneas laterales muy largas
– Usable en condiciones topográficas difíciles, terrenos inclinados y colinas.

TORO®

www.toro-ag.it
www.toro.com

@Toro Italia

@isesrl

@ISEontheweb

2.5. Cultivos hortícolas en invernadero

2.5.1. Manejo del clima bajo invernadero mediterráneo para aumentar la eficiencia hídrica

Mª Cruz Sánchez-Guerrero, Evangelina Medrano* y Pilar Lorenzo Mínguez

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Centro "La Mojonera"

* evangelina.medrano@juntadeandalucia.es

Índice

1. Introducción 185

2. Enriquecimiento carbónico del aire en el invernadero 186

3. Refrigeración 188

Resumen

Las condiciones climáticas dentro de los invernaderos a menudo se alejan de los niveles adecuados para el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Una gestión ambiental adecuada de los invernaderos permite aumentar la productividad, así como modificar las necesidades hídricas de los cultivos. En este capítulo se presentan algunos resultados experimentales relacionados con la influencia de la aplicación de distintas técnicas de gestión del clima en invernadero sobre la eficiencia del uso del agua en cultivos hortícolas.

1. Introducción

El cultivo bajo invernadero permite modificar las condiciones climáticas de temperatura, humedad y concentración de CO_2 en su interior mediante la aplicación de sistemas de calefacción, refrigeración y de enriquecimiento carbónico. Sin embargo, el sistema de producción hortícola bajo invernadero del litoral mediterráneo español se basa en el uso de estructuras de bajo coste, en los que el equipamiento para mejorar el clima interior, en la mayoría de los casos, se limita a la gestión manual de una ventilación natural generalmente insuficiente y al uso de sombreado de bajo coste (encalado de la cubierta) en épocas de alta radiación. El bajo nivel tecnológico de estas estructuras determina su dependencia climática de los factores ambientales externos y a menudo representan una limitación importante de la producción y calidad que puede cuestionar la competitividad del sector, en un mercado cada vez más exigente en calidad y en el suministro continuado. Además, la creciente preocupación de la sociedad por los aspectos medioambientales provoca una fuerte presión para reducir el

impacto negativo que generan estos sistemas de producción y, en este sentido, la mejora en la eficiencia del uso del agua es una cuestión prioritaria.

Una gestión ambiental adecuada de los invernaderos puede reducir la demanda de agua y normalmente está asociada a un incremento productivo, ambos factores contribuyen a la mejora de la eficiencia del uso del agua del sistema en cuanto a kg de fruto producidos por volumen de agua consumida o aportada.

Los principales factores que afectan al consumo hídrico de las plantas son la radiación, el déficit hídrico del aire y su desarrollo foliar. Puede ocurrir que los cambios en el clima influyan sobre los tres factores anteriormente citados con diferente intensidad o bien incluso que la influencia sobre uno de ellos sea contrarrestada por la influencia sobre otro. El estado hídrico de la planta se relaciona con el balance entre los flujos de transpiración y de absorción de agua. Si bien el flujo de transpiración está directamente relacionado con el clima, la absorción de agua está condicionada además por otros factores como la disponibilidad y composición de la solución nutritiva y el nivel de aireación y temperatura del entorno radical.

A continuación, se mostrarán algunos de los resultados obtenidos en trabajos de investigación desarrollados en el Centro IFAPA La Mojonera (Almería) relacionados con la influencia de la aplicación de distintas técnicas de gestión del clima en invernadero sobre la eficiencia del uso del agua en cultivos hortícolas.

2. Enriquecimiento carbónico del aire en el invernadero

La concentración de CO_2 del aire es una variable climática importante para controlar en un invernadero y su aumento hasta niveles entre 700 y 900 µmol mol^{-1} permite obtener incrementos importantes de la producción y calidad de los cultivos (Mortensen, 1987). En atmósferas enriquecidas con CO_2 la transpiración foliar disminuye (Zabri y Burrage, 1996); sin embargo, en invernadero este efecto se reduce por una disociación entre la respuesta de la transpiración y de la conductancia estomática foliar, provocada por efectos de retroalimentación térmicos e hidrológicos (Nederhoff y de Graaf, 1993).

En el caso de los invernaderos mediterráneos, el aporte de CO_2 a nivel experimental se ha supeditado a la ventilación por razones económicas y medioambientales y se ha llevado a cabo una estrategia basada en duplicar la concentración atmosférica con ventanas cerradas e intentar mantener la concentración exterior cuando las ventanas se abren para evitar pérdidas innecesarias (Sánchez-Guerrero *et al.,* 2005); con esta estrategia de enriquecimiento carbónico los valores máximos de concentración de CO_2 se alcanzan a primera y a última hora del día, coincidiendo con una baja/media intensidad de radiación solar y por tanto minimizándose su efecto sobre la transpiración.

En la Figura 1 se muestra a) la diferente evolución de la concentración de CO_2 obtenida en el aire de un invernadero enriquecido (800 µmol CO_2 mol^{-1} con ventanas cerradas; 400 µmol CO_2 mol^{-1} con ventanas abiertas) frente a un invernadero no enriquecido, con una misma radiación incidente y b) la transpiración de plantas de pimiento registrada cada 5 minutos, de forma simultánea en ambos invernaderos. La estrategia de enriquecimiento aplicada, vinculada a la

ventilación, no afectó al consumo hídrico y éste fue condicionado por la intensidad de la radiación solar incidente.

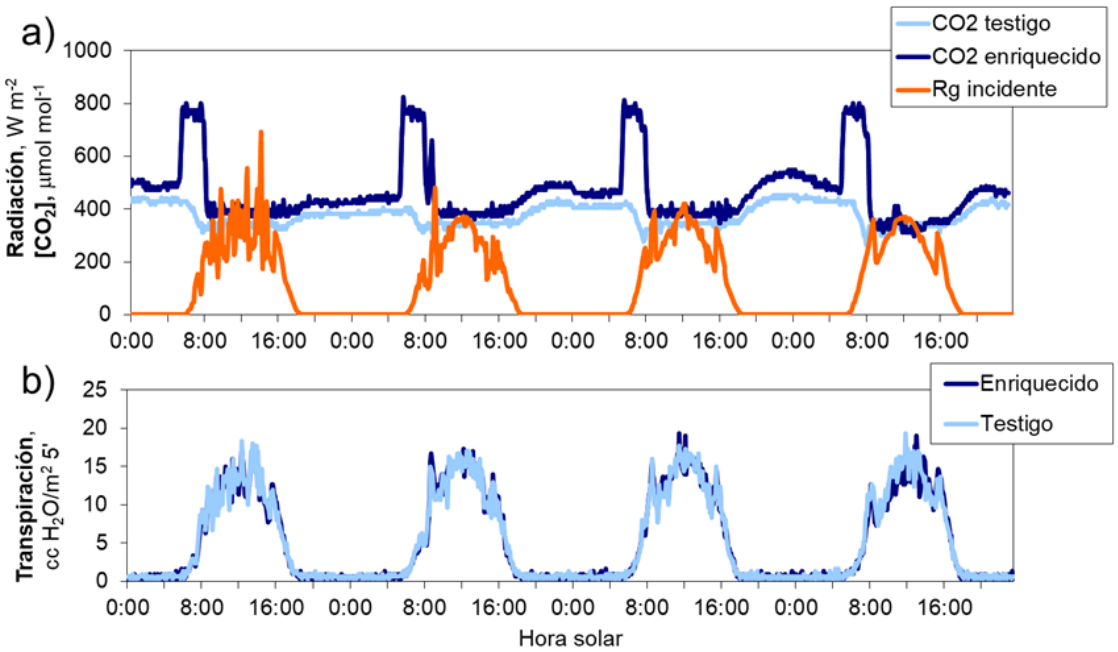


Figura 1.- a) Evolución de la concentración de CO_2 en el aire de un invernadero enriquecido y testigo y la radiación solar incidente sobre los cultivos. b) Evolución de la transpiración de un cultivo de pimiento registrada cada 5 minutos simultáneamente en un invernadero enriquecido con CO_2 y en otro no enriquecido

Como se muestra en la Tabla 1, la aplicación de enriquecimiento carbónico no afectó significativamente al desarrollo foliar de la planta en los cultivos de pepino, tomate y pimiento, lo cual unido a la similitud obtenida en el consumo hídrico total indica la escasa influencia del enriquecimiento carbónico sobre la transpiración del dosel vegetal, en concordancia con los resultados de Nederhoff y de Graaf (1993) en cultivo de tomate y pepino en invernadero, que reflejan un efecto reducido del aumento de la concentración de CO_2 sobre la transpiración, a pesar de la reducción significativa de la conductancia foliar. Sin embargo, el importante efecto del aporte de CO_2 sobre la producción comercial obtenido en dichos cultivos determinó una mejora importante de la eficiencia del uso del agua consumida por el cultivo (WUEc) del 24% en pepino, 20% en tomate y 19% en pimiento.

Además, cuando el cultivo se desarrolla en sustrato, la mayor absorción de nutrientes promovida por la mayor producción de materia seca en el cultivo enriquecido con CO_2 induce una menor concentración de los nutrientes en el entorno radicular y por tanto una menor conductividad eléctrica (CE). Normalmente la gestión del riego en cultivo en sustrato está asociada a mantener un valor de CE consigna en la solución lixiviada, por tanto, cuando se aplique enriquecimiento carbónico las necesidades de lixiviación serán menores. En cultivo de pepino, pimiento y tomate en perlita se realizó un menor aporte de agua en el cultivo enriquecido frente al testigo para consumos hídricos similares (Tabla 1). La eficiencia en el uso del agua aportada (WUEa), referida a la producción de fruto comercial aumentó en un 41% en pepino, 25% en pimiento y 23% en tomate.

Tabla 1. Aporte y consumo hídrico, Índice de Área Foliar (IAF) y eficiencia del uso del agua aportada (WUEa) y del agua consumida por el cultivo (WUEc) respecto a la producción comercial de fruto, obtenidos en invernadero enriquecido con CO2 y testigo con cultivos en sustrato de pepino, pimiento y tomate tipo RAF. (Datos extraídos de: Sánchez-Guerrero *et al.*, 2009; Sánchez-González *et al.*, 2016; Porras, 2021)

Cultivo	Invernadero	Aporte hídrico ($L\ m^{-2}$)	Consumo hídrico ($L\ m^{-2}$)	IAF ($m^2\ m^{-2}$)	WUEa ($g\ L^{-1}$)	WUEc ($g\ L^{-1}$)
Pepino 1997/98	Testigo	239	153	3,26	48	75
	Enriquecido	202	147	3,26	69	93
				n.s.		
Tomate 2012/13	Testigo	457	234	1,75	29	57
	Enriquecido	420	216	1,76	35	69
		***	n.s.	n.s.	***	**
Pimiento2013/14	Testigo	410	222	1,8	15	27
	Enriquecido	404	231	1,7	18	32
				n.s.	**	**

n.s.: no significativo. *, ** y ***: Significativo a $p \leq 0,05$, 0.01 y 0.001 respectivamente

3. Refrigeración

En el ámbito mediterráneo durante las estaciones de primavera, verano e inicio del otoño las condiciones de alta radiación y fuerte demanda evaporativa, que tienen lugar en la atmósfera de los invernaderos, generan regímenes térmicos e higrométricos estresantes que provocan pérdidas de rendimiento y calidad de los frutos (Katsoulas *et al.*, 2006). La evolución de las estructuras de cultivo incorpora sistemas de ventilación pasivos de mayor superficie, de accionamiento manual o automático, que permiten mejorar el clima interior; sin embargo, en días de elevada radiación la ventilación natural sigue siendo insuficiente para extraer el exceso energético y permitir condiciones de temperatura y humedad adecuadas para los cultivos. Entre las posibles actuaciones a combinar con la ventilación natural para mejorar estas condiciones se encuentran la reducción de la radiación mediante el sombreado y el aporte de vapor de agua.

Cuando se utiliza el sombreado de la cubierta como método de refrigeración se actúa principalmente sobre el nivel de radiación que incide sobre el cultivo, pero la reducción resultante de la temperatura afecta al DPV del invernadero ya que, para una misma concentración de vapor de agua en el aire, el déficit de presión de vapor disminuye a medida que se reduce su temperatura. En la Figura 2a se muestra cómo la actuación dinámica de una malla de sombreo provoca una recuperación total de la radiación incidente sobre el cultivo cuando ésta se recoge y sin embargo el DPV no llega a alcanzar los valores que se registran en el invernadero testigo, como consecuencia el consumo hídrico del cultivo sombreado es menor que en el testigo incluso en las fases en que la malla se encuentra recogida (Figura 2b).

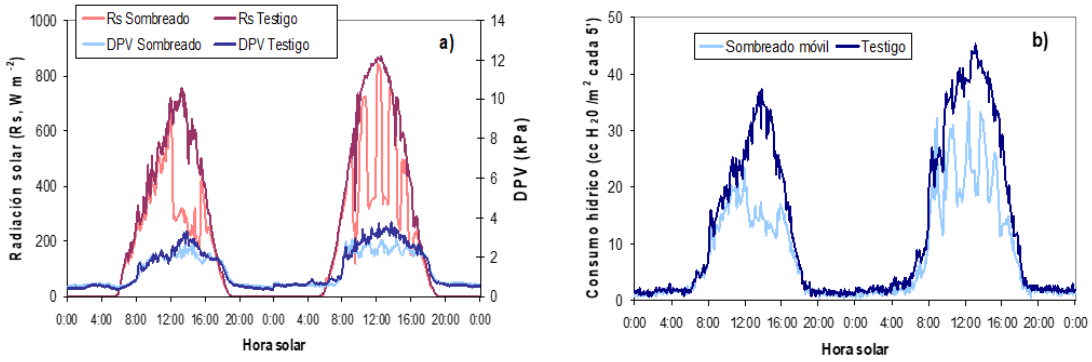


Figura 2. Evolución de los parámetros climáticos radiación y DPV (a) y del consumo hídrico (b) registrados cada cinco minutos en un invernadero testigo, sin sombreado, frente a otro provisto de malla móvil en el exterior de la cubierta. Cultivo de pepino en campaña de primavera

El sombreado en los invernaderos debe manejarse con la mayor precisión posible cuando se cultivan plantas de alta saturación lumínica, como son las hortalizas comestibles, porque un sombreado excesivo podría reducir la producción potencial de estos cultivos. La mayoría de los productores optan por el encalado como método de sombreado que se aplica en un 97% de la superficie de invernaderos en la provincia de Almería (Lorenzo *et al.*, 2016). El mayor inconveniente de esta técnica es su falta de flexibilidad para adaptar el sombreado a los cambios de intensidad de la radiación solar a lo largo del día y del periodo de cultivo, lo que conlleva pérdidas considerables del potencial productivo de los cultivos. Como alternativa al sombreado fijo, el sombreado móvil permite la limitación de su actuación diurna a los periodos en los que las condiciones del invernadero son más estresantes, generalmente en torno al mediodía solar, permitiendo una mejora de la integral de radiación incidente sobre el cultivo, sin afectar considerablemente a los máximos térmicos e higrométricos del aire alcanzados en el invernadero.

En cultivo de pepino de primavera, en sustrato de perlita, el uso de sombreado móvil redujo en un 22,4% la integral total de radiación incidente sobre el cultivo respecto a un invernadero sin sombreado (Testigo), mejorando la temperatura del aire y mitigando el estrés higrométrico que provocan las condiciones de alta demanda evaporativa, especialmente durante las primeras fases de cultivo cuando el índice de área foliar es bajo. Las plantas cultivadas en el invernadero sombreado mostraron un mayor desarrollo foliar y un incremento de la producción comercial respecto al testigo sin sombreado (Tabla 2). El sombreado selectivo, al reducir la radiación incidente disminuyó la transpiración del dosel vegetal, de manera que al final del cultivo se obtuvo una reducción del 31% en el consumo hídrico. Como consecuencia, la eficiencia en el uso del agua consumida (WUEc) fue notablemente superior en el cultivo sombreado (Tabla 2). En cultivo de tomate de primavera, con una reducción del 36% en la radiación total incidente se obtuvo una mejora de la WUEc a pesar de que la producción comercial fue similar en al cultivo sin sombreado, como consecuencia del menor consumo hídrico realizado por el cultivo sombreado (Tabla 2).

Resultados experimentales reflejan una mejora del 7% en la WUEa con el uso del sombreado móvil en comparación con el sombreado fijo (encalado) en un cultivo de tomate, a pesar de la mayor necesidad de aporte hídrico en el primero debido a que el aumento en la radiación

incidente (31% más de radiación fotosintéticamente activa) resultó en una mayor producción de fruto comercial (Tabla 2).

Tabla 2. Índice de área foliar (IAF), producción comercial, consumo o aporte de agua y eficiencia del uso del agua consumida (WUEc) o del agua aportada (WUEa), en relación a la producción de fruto comercial (Datos extraídos de: Caparrós *et al.*, 2005; Lorenzo *et al.*, 2003; Lorenzo *et al.*, 2004 y García-Balaguer *et al.*, 2017).

		IAF (m^2 m^{-2})	Producción comercial (kg m^{-2})	Consumo hídrico (L m^{-2})	WUEc (g L^{-1})
Pepino 2004	Testigo	4,0	16,3	346	47
	Sombreado móvil	4,4	18,6	240	78
		*	*		
Tomate 2002	Testigo	4.4	11,1	480	23
	Sombreado móvil	5,1	12,1	326	37
		n.s.	n.s.		
Tomate 2003	Sombreado CE 3	4,5	15,2	367	42
	Nebulización CE 3	4,0	15,4	417	37
		n.s.	n.s.		
	Sombreado CE 5,5	4,1	11,5	323	36
	Nebulización CE 5,5	3,3	8,1	386	21
		*	*		
				Aporte hídrico (L m^{-2})	**WUEa (g L^{-1})**
Tomate 2013	Sombreado fijo (Blanqueo)	4,9	9,9	390	25
	Sombreado móvil	4,9	12,4	456	27
		n.s.	*		

n.s.: no significativo. *, Significativo a $p \leq 0,05$

En cuanto a la aplicación de nebulización en invernadero, el aumento del vapor de agua en el aire permite reducir el estrés térmico e higrométrico que se produce habitualmente en épocas de elevada radiación, fundamentalmente en fases de escaso desarrollo de los cultivos. El valor medio obtenido durante un ciclo de cultivo de tomate de primavera de los registros máximos alcanzados en un invernadero testigo fue de 3.3 kPa mientras que en un invernadero controlado por el sistema de nebulización presentó un valor de 1.9 kPa. Al reducir el déficit de presión de vapor (DPV) del aire se incide directamente en la transpiración, provocando su reducción en mayor o menor intensidad dependiendo del cultivo (Figura 3).

Al comparar en un cultivo de tomate el uso de la nebulización frente al sombreado móvil en ciclo de primavera se obtuvieron valores máximos de temperatura similares en el interior de los invernaderos, sin embargo, los valores máximos de DPV fueron menores con la nebulización. El sombreado, que redujo la incidencia total de radiación global en un 20,5% respecto al invernadero con nebulización, dio lugar a una menor producción total cuando se utilizó agua de

riego sin salinidad (conductividad eléctrica -CE- de la disolución nutritiva de 3 dS m^{-1}) mientras que la producción comercial fue similar bajo los dos sistemas de climatización (Tabla 2); sin embargo en condiciones de mayor salinidad (CE 5,5) se produjo un aumento considerable de la producción comercial en el tratamiento sombreado debido a la menor incidencia de necrosis apical que en el invernadero con nebulización (Tabla 2); el uso de agua de moderada salinidad induce necrosis apical en el fruto de tomate y la reducción del déficit de presión de vapor con la nebulización sin una reducción proporcional de la radiación no mejoró la incidencia de esta fisiopatía debido al desequilibrio entre las altas tasas de crecimiento de fruto derivadas del elevado nivel de radiación y la reducción de la transpiración que probablemente de forma paralela propicia una reducción del flujo xilemático de calcio hacia el fruto. La eficiencia en el uso del agua consumida por el cultivo fue mayor con el uso de sombreado que con nebulización (Tabla 2), lo que resulta más evidente si se considera la cantidad de agua usada en la aplicación de este último (116 L m^{-2}).

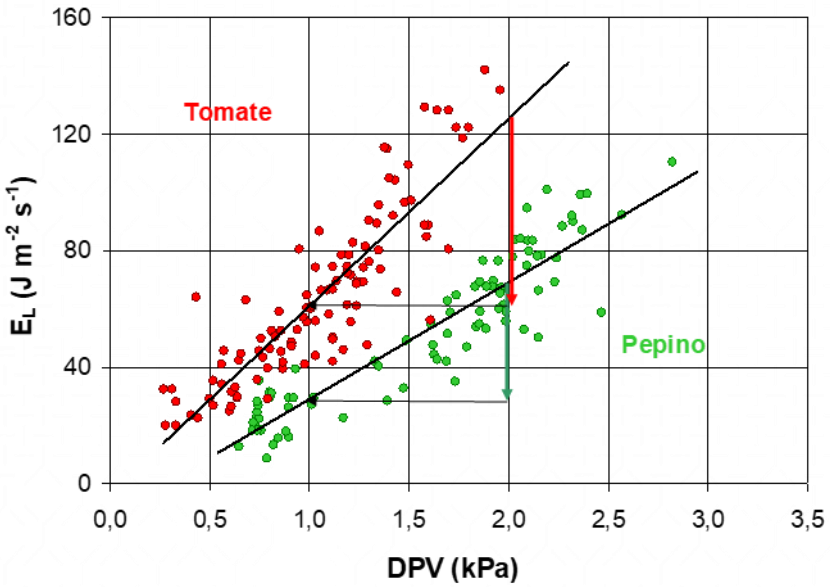


Figura 3. Relación entre la transpiración foliar (EL, en términos de energía) y el déficit de presión de vapor (DPV) del aire del invernadero en cultivo de tomate y pepino (Lorenzo *et al.*, 2006)

Bibliografía

Caparrós, I.; Medrano, E.; García, M.L.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Botelho, R.; Lorenzo, P. (2005). El sombreado móvil exterior del invernadero: efecto sobre el microclima, la eficiencia en el uso del agua y la producción de un cultivo de pepino bajo diferentes niveles de salinidad de la solución nutritiva. Actas V Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas Vol. 5: 91-97.

García-Balaguer, M.L.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Medrano, E.; Baeza, E.J.; Sánchez-González, M.J.; Porras, M.E.; Giménez, M.; Lorenzo, P. (2017). Mobile shading versus whitewashing: evaluation of the agronomic response of a tomato crop. Acta Hortic. 1170: 959-965. DOI 10.17660/ActaHortic.2017.1170.123.

Katsoulas, N.; Kitta, E.; Kittas, C.; Tsirogiannis, I. L.; Stamati, E.; Savvas, D. (2006). Greenhouse cooling by a fog system: Effects on microclimate and on production and quality of a soilless pepper crop. Acta Horticulturae. 719: 455-461.

Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Medrano, E.; García, M.L.; Caparrós, I.; Giménez, M. (2003). External greenhouse mobile shading: effect on microclimate, water use efficiency and yield of a tomato crop grown under different salinity levels of the nutrient solution. Acta Horticulturae 609:181-186.

Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Medrano, E.; García, M.L.; Caparrós, I.; Coelho, G; Giménez, M. (2004). Climate control in the summer season: a comparative study of external mobile shading and fog system. Acta Horticulturae 659:189-194.

Lorenzo, P.; García, M.L.; Sánchez-Guerrero, MC.; Medrano, E.; Caparrós, I.; Giménez, M. (2006). Influence of mobile shading on yield, crop transpiration and water use efficiency. Acta Horticulturae 719:471-478.

Lorenzo, P.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Medrano, E.; Baeza, E.; López, J.C.; Magán, J.J.; Fernández, M.D.; Pérez-Parra, J. (2016). Capítulo 3. Invernaderos. En: El sistema de producción hortícola protegido de la provincia de Almería.

Mortensen, L.M. (1987). Review: CO_2 enrichment in greenhouses. Crop responses. Sci. Hort. 33, 1–25.

Nederhoff, E.M.; de Graaf, R. (1993). Effects of CO_2 on leaf conductance and canopy transpiration rate of greenhouse grown cucumber and tomato. J. Hort. Sci. 68, 925–937.

Porras, M.E. (2021). Estudio de la aclimatación al aporte variable de CO_2 en invernadero. Nuevas estrategias para mejorar la eficiencia del enriquecimiento carbónico en condiciones mediterráneas. Tesis doctoral. Universidad de Almería. 100 pp.

Sánchez-Guerrero, M.C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Castilla, N.; Soriano, T. ; Baille, A. (2005). Effect of variable CO_2 enrichment on greenhouse production in mild winter climate. Agricultural and Forest Meteorology 132:244- 252.

Sánchez-Guerrero, M.C.; Lorenzo, P.; Medrano, E.; Baille, A.; Castilla, N. (2009). Synergistic effects of EC-based irrigation scheduling and CO_2 enrichment on water use efficiency of a greenhouse cucumber crop. Agricultural Water Management 96: 429-436.

Sánchez-González, M.J.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Medrano, E.; Porras, M.E.; Baeza E.J.; Lorenzo, P. (2016). Carbon dioxide enrichment: a technique to mitigate the negative effects of salinity on the productivity of high value tomatoes. Spanish Journal of Agricultural Research, 14(2), e0903, 13 pages. http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2016142-8392

Zabri, A.W.; Burrage, S.W. (1996). The effects of vapour pressure deficit (VPD) and enrichment with CO_2 on photosynthesis, stomatal conductance, transpiration rate and water use efficiency (WUE) of sweet pepper (Cpsicum annuum L.) grown by NFT. Acta Hort. 458, 351–356

2.5.2. Optimización del uso del agua y fertilizantes en cultivos hortícolas bajo invernadero. Riego a demanda con electrotensiómetros

Rafael Baeza Cano

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Centro "La Mojonera"

rafaelj.baeza@juntadeandalucia.es

Índice

1. Introducción 194
2. Tecnologías para regar a demanda del cultivo. Electrotensiómetros 195
3. Limitaciones para la implementación del riego a demanda con electrotensiómetros 198
4. Gestión de la información de los sensores. Modalidades de riego a la demanda 199
   4.1. Control de la frecuencia de riego 200
   4.2. Control de la frecuencia y dotación de riego 201
5. Instalación de tensiómetros en invernaderos 202
6. Trabajos de riego a demanda desarrollados en el ifapa 203
   6.1. Diseño experimental 203
   6.2. Principales resultados observados 206

Resumen

Este capítulo trata sobre la tecnología de riego a demanda basada en la lectura de la tensión matricial del suelo haciendo uso de electrotensiómetros. Se comentan las posibilidades que presenta la tecnología para su implementación en el control del riego de cultivos hortícolas intensivos y las limitaciones que puede presentar. Se describen las modalidades de riego y las pautas de manejo para un correcto funcionamiento de los equipos. Se muestran algunos resultados de trabajos desarrollados en el IFAPA. La tecnología se ha mostrada eficaz en el control de los niveles de tensión matricial en el suelo. Se han alcanzado las mayores producciones cuando se trabaja con tensiones de activación de inferior valor absoluto. Por el contrario, el consumo de agua es menor cuando se trabaja con tensiones de activación de mayor valor absoluto. En estos tratamientos de menor consumo de agua se ha obtenido la mayor productividad del agua.

1. Introducción

La disponibilidad de agua se ha convertido en la mayor limitación para el desarrollo de los regadíos de la Cuenca Mediterránea. En España la máxima limitación se localiza en el sureste (Cramer *et al.,* 2018). En esta zona predominan los cultivos hortícolas bajo invernadero. En las provincias de Almería y Granada se concentra más del 50% de la superficie bajo invernadero de España, 39717 ha de un total de 76600 ha (MAPA, 2022).

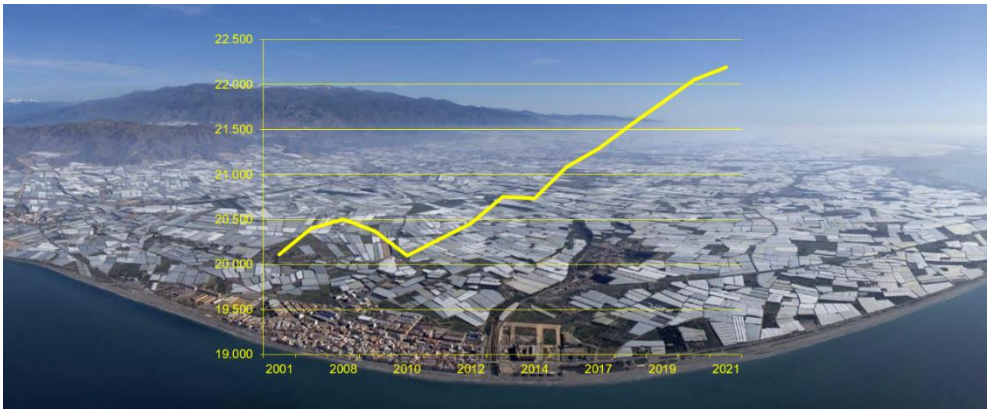


Figura 1. Evolución reciente de la superficie de invernaderos en el Campo de Dalías, principal comarca productora de Almería

En general estos cultivos se caracterizan por presentar una elevada productividad y eficiencia en el uso del agua (Gallardo *et al.,* 2007, Fernández *et al.,* 2007). Sin embargo, el incremento de la eficiencia en el uso del agua no siempre permite reducir el déficit hídrico (Berbel *et al.,* 2018). El déficit se ha suplido mediante la sobreexplotación de los recursos subterráneos de agua, reduciéndose la disponibilidad y calidad de los mismos (Pulido-Bosh, 2019; Caparros-Martínez *et al.,* 2020). Para garantizar la sostenibilidad del sistema, los responsables de la gestión de los recursos hídricos en el sureste de España se han decantado por la incorporación de fuentes de agua no convencionales, desaladas principalmente. La Confederación Hidrográfica del Segura y la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas prevén disponer respectivamente, en el horizonte 2027, de 209 y 244 hm^3 $año^{-1}$ procedentes de la desalación (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2020; Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, 2020). La incorporación de las nuevas fuentes de agua ha supuesto un aumento del coste medio del agua para los regantes debido principalmente al incremento del coste energético (Melgarejo *et al.,* 2019). El binomio agua-energía debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar las planificaciones hidrológicas (Scardigno, 2020). En estas condiciones de déficit y escalada de los costes del agua los productores están obligados a maximizar la eficiencia y productividad del agua (Albaladejo *et al.,* 2018).

Se utilizan diferentes índices para medir la eficiencia del uso del agua en la agricultura. El más empleado tradicionalmente ha sido la eficiencia de la aplicación del riego, definido como el porcentaje del agua aplicada por el riego que queda retenida en el perfil del suelo explorado por las raíces del cultivo. Recientemente se emplean con mayor frecuencia los índices productivistas. Se habla de bioproductividad del riego como la cosecha producida por unidad de volumen de agua consumida y de productividad económica del riego como el valor de venta de esa cosecha por unidad de volumen de agua consumida. Cuando se tienen en cuenta, además de los ingresos, los costes de cultivo, se habla de productividad económica neta, como el cociente entre el

beneficio y el volumen de agua consumido por el riego. Existe un importante margen de mejora en la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes por los agricultores de invernadero (Nikolaou *et al.*, 2019). Actualmente existen diferentes líneas de trabajo encaminadas a la mejora de la eficiencia en el uso del agua por los cultivos. Algunas de estas líneas plantean estrategias biológicas, como son la selección de cultivos y variedades con un menor consumo de agua (Kumar *et al.,* 2012) o, incluso la mejora genética con el fin de obtener genotipos resistentes al estrés hídrico. No obstante, la tolerancia a la sequía por las plantas es algo muy complejo y existe bastante desconocimiento respecto a la genética que interviene (Shulz *et al.,* 2021). Otras líneas plantean actuaciones a nivel de explotación que puedan incrementar la eficiencia en el uso del agua. Entre estas se incluyen: i) estrategias clásicas de reducción de la evaporación como el acolchado del suelo (Nouri *et al.,* 2019; Jayakumar *et al.,* 2017) o el riego localizado subterráneo (Al Ghobari & Dewidar, 2018; Mo *et al.,* 2017) y ii) estrategias de implementación reciente como la incorporación de sistemas de soporte a las decisiones (DSS), que generalmente plantean un manejo integral del riego, la fertilización y otros aspectos del cultivo (Lindblom et al, 2017), o la incorporación de tecnologías que incidan específicamente en el control de las aplicaciones de riego (Dukes *et al.,* 2003). Por lo que respecta a la reducción de la evaporación directa del suelo, el 77% de los cultivos hortícolas intensivos del sureste de España se desarrollan sobre suelos enarenados. En estos se ha aplicado una capa de unos 5-10 cm de espesor de arena de granulometría gruesa (1-5 mm), que reduce drásticamente la capilaridad y la evaporación directa del suelo (Garcia *et al.,* 2016). Por otro lado, los principales estudios realizados con DSS en cultivos hortícolas intensivos en el sureste de España determinan las necesidades hídricas mediante el cálculo predictivo de la ETc con datos climáticos medios o datos a tiempo real (Gallardo *et al.,* 2014; Gallardo *et al.,* 2017; Gavilán *et al.,* 2008). Sin embargo, el diferente desarrollo vegetativo obtenido para un mismo cultivo en función de la variedad y las condiciones de crecimiento ha dirigido las investigaciones más recientes hacia la determinación dinámica del Kc in situ, mediante sistemas de digitalización de fotos que monitorizan el crecimiento de la planta (González-Esquiva *et al.,* 2017), así como sistemas de gestión a la demanda del riego. En ellos el riego se gestiona con la información de uno o varios sensores de toma de decisión instalados en campo.

2. Tecnologías para regar a demanda del cultivo. Electrotensiómetros

Existen diferentes tipologías de sensores para el manejo del riego. Normalmente se clasifican en sensores que miden parámetros de planta y sensores de suelo. Por lo que se refiere a los sensores de planta diferentes estudios muestran las posibilidades potenciales de los sensores de temperatura de hoja (Erdem *et al.*, 2010; Cremona *et al.,* 2011; Tejero *et al.,* 2015), de flujo de savia (Möller *et al.,* 2004; Takeuchi, 2011; Takeuchi y Cohen, 2013) y de variación del diámetro de tallo (Fernández y Cuevas, 2010).

Sin embargo, la aplicación en huertos comerciales de estas tecnologías se ve limitada por la dificultad en el manejo de los datos y en el uso y mantenimiento de los sensores. Por otro lado, medir el estado hídrico del cultivo es generalmente más difícil y costoso que medir el estado hídrico del suelo. Además, el estado hídrico de la planta no está afectado únicamente por la disponibilidad de agua en el suelo, sino también por cambios a corto plazo en el ambiente del

cultivo o por la afección de plagas y enfermedades. Por tanto, cambios en el estado hídrico de la planta no son necesariamente indicativos de cambios en la disponibilidad de agua en la zona radicular (Van Iersel *et al.,* 2013). En el caso de los sensores de flujo de savia y de diámetro de tallo, su aplicación en el manejo del riego de cultivos leñosos parece más factible, donde se han centrado la mayoría de los estudios con estos equipos. Como consecuencia de todas estas limitaciones, la aplicación en fincas comerciales de sistemas de control del riego basados en el control de parámetros de planta es mínima, especialmente en cultivos hortícolas (Jones, 2004; Fernández, 2014; Incrocci *et al.,* 2020; Pardosi y Incrocci, 2011). En cambio, el manejo del riego empleando sensores de suelo está mucho más extendido. Los trabajos de investigación con sensores de humedad de suelo se llevan desarrollando desde hace décadas. El mercado de este tipo de instrumentación es muy amplio. Se agrupan principalmente en: i) Sonda de Neutrones, ii) Sonda de Atenuación de Rayos Gamma, iii) Radar de Penetración en el Suelo, iv) Sonda de Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR), v) Sonda de Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR) y vi) sensores que miden el potencial matricial del suelo: Tensiómetros y Sensores de resistencia eléctrica como los Bloques de Yeso. i) y ii) son aparatos que utilizan radioactividad, por ello requieren una especial cualificación del operador ya que su uso es potencialmente peligroso para la salud y el medio ambiente. Las medidas de iii), iv) y v) pueden verse influenciadas por la salinidad del suelo. Las principales ventajas de los dispositivos tipo iv) y v) son que, con calibración previa, son capaces de proporcionar valores absolutos de humedad del suelo y que pueden implantarse a cualquier profundidad. El hecho de que estos instrumentos requieren calibración y por ello una especial cualificación del usuario, unido a que la mayor parte de ellos presenta un elevado coste, ha limitado la extensión de su uso en fincas comerciales (Schmugge *et al.,* 1980; Thompson y Gallardo, 2003; Dobriyal *et al.,* 2012). Actualmente existen modelos más económicos, pero la necesidad de calibración y la variabilidad de las medidas que pueden ocasionar distintos factores como la salinidad, pedregosidad, etc. siguen limitando su implantación para el riego a demanda. La extensión del uso de los sensores que miden potencial matricial es mucho mayor. Normalmente cuando se trabaja con cultivos en los que se mantiene la humedad del suelo cercana a niveles de saturación se utilizan tensiómetros, mientras que cuando se trabaja con niveles de humedad más alejados de la saturación se emplean bloques de yeso. En los cultivos hortícolas se mantienen niveles de humedad elevados. Por ello en estos cultivos se ha generalizado el empleo de tensiómetros. El potencial matricial se puede considerar una medida indirecta de la humedad del suelo y es originado por las fuerzas que retienen el agua en los capilares y sobre las partículas del suelo. Un tensiómetro consiste en un tubo que termina en una punta de cerámica porosa en la parte inferior (cápsula cerámica). El tubo se llena completamente de agua y se cierra herméticamente por la parte superior. Durante la instalación la cápsula cerámica se introduce en el suelo quedando completamente rodeada por las partículas del suelo y microporos. La cerámica comunica el agua del interior con la solución del suelo. El suelo succionará el agua interior del tensiómetro. La succión se registrará a través de un medidor de "vacío" o presión negativa denominado vacuómetro, que se sitúa en la parte superior del tensiómetro. La medida del vacuómetro será equivalente a la tensión matricial del suelo.

Desde hace años es posible digitalizar la medida del tensiómetro mediante el empleo de transductores de presión, que sustituyen al vacuómetro analógico (Watson *et al.,* 1975; Marthaler *et al.* 1983; Lowery *et al.,* 1986). Si el registro automático de los datos se incorpora a

un programador de riego se puede emplear el tensiómetro como sensor de control del riego. A día de hoy, en cultivos hortícolas intensivos, la expansión comercial de la tecnología para el riego a la demanda con tensiómetros electrónicos es más que evidente. En el Sureste de España hay más de una decena de empresas que comercializan la tecnología. No obstante, es preciso conocer en profundidad el funcionamiento de la tecnología y ajustar las consignas de actuación para maximizar la eficiencia y la productividad del agua.

Figura 2. Sensor de temperatura de hoja (Imagen termográfica de infrarrojos) en un cultivo de pimiento

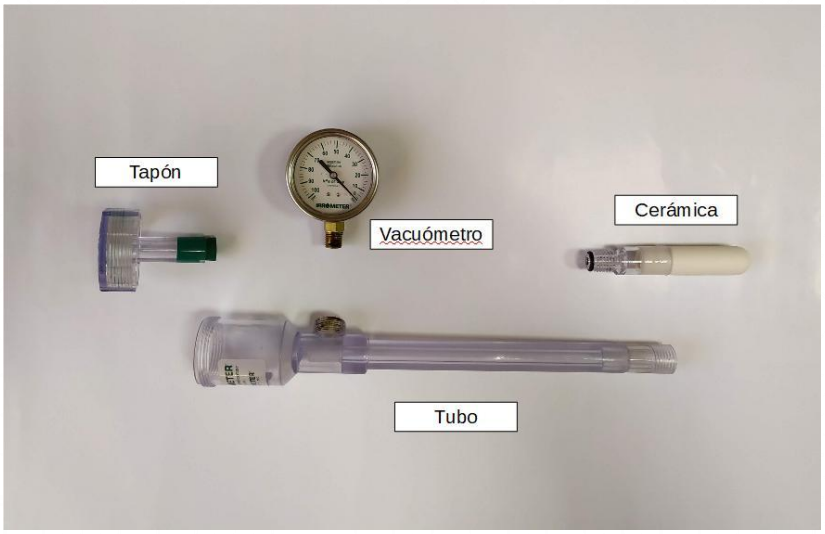


Figura 3. Despiece de un tensiómetro

Figura 4. Dos modelos de electrotensiómetros instalados en un suelo enarenado

3. Limitaciones para la implementación del riego a demanda con electrotensiómetros

En los cultivos intensivos los electrotensiómetros se han impuesto frente a otros sensores digitales de humedad del suelo porque su medida se ve escasamente afectada por la salinidad y temperatura del suelo, los resultados no dependen del tipo de suelo o textura, no requieren de calibración previa, su instalación es relativamente sencilla, su coste es relativamente bajo, se adaptan bien a suelos de textura fina con elevados niveles de arcilla y se muestran bastante precisos cuando se trabaja con niveles de humedad de suelo elevados, manejo habitual en cultivos hortícolas.

Sin embargo, es necesario conocer los posibles inconvenientes que puedan afectar a su correcto funcionamiento. Entre ellos hay que destacar:

- Su funcionamiento es hidráulico. Si se produce una entrada de aire en el tubo del tensiómetro se descarga y deja de funcionar. La entrada de aire se puede producir bien por trabajar con bajos niveles de humedad de suelo (elevada tensión matricial), bien como consecuencia de una mala instalación o por un deficiente sellado del acople de las distintas partes. No obstante, la entrada de aire es fácilmente detectable, ya que de manera brusca la tensión se sitúa en 0 kPa.
- Como consecuencia de lo anterior, no son adecuados para trabajar en cultivos en los que se mantienen niveles de humedad de suelo muy bajos. Normalmente con tensiones inferiores a -60-80 kPa pueden descargarse (Stannard D.I., 1986).
- Requieren de ciertas labores de mantenimiento entre campañas de riego y de una mínima capacitación del operario (Miglaccio *et al.*, 2002; Baeza *et al*., 2020).

Por otro lado, al igual que el resto de sensores de humedad de suelo, los tensiómetros dan información del punto de localización en el terreno. La calidad de la información registrada se puede mejorar incrementando el número de tensiómetros. Esto supondrá un incremento del coste de instalación y no es sencillo determinar el número óptimo de sensores a instalar, que dependerá de la variabilidad espacial de la tensión matricial en el suelo de cultivo (Van Iersel *et al.*, 2013). En suelos heterogéneos la medida de cada tensiómetro es poco representativa de la totalidad. En estos casos es necesario dividir la superficie de riego en sectores de suelo homogéneo y monitorizar cada uno de estos sectores. Un criterio de división puede ser la textura del suelo, en concreto el porcentaje de partículas finas (Zhao *et al.,* 2018). Los suelos enarenados típicos del sureste de España pueden resultar ventajosos a este respecto, ya que se construyen aplicando una capa de tierra fértil homogénea sobre la que se aporta una capa de arena de granulometría gruesa a modo de acolchado. Esto garantiza una mayor uniformidad en la distribución de la humedad del suelo.

Otro aspecto a tener en cuenta es el comportamiento de los electrotensiómetros con temperaturas extremas. La lectura de los transductores de presión puede verse afectada por oscilaciones térmicas diarias y por temperaturas elevadas (Watson y Jackson, 1967; Warrick *et al.,* 1998). Los cultivos hortícolas en invernadero desarrollados en el sureste de España presentan un control de clima pasivo, que no permite evitar, en determinados periodos del año, el que se produzcan saltos térmicos diarios elevados. Además, durante el periodo estival se pueden alcanzar temperaturas en el aire superiores a los 50 °C y superiores a 35 °C en las horas centrales del día en, prácticamente, cualquier periodo del año.

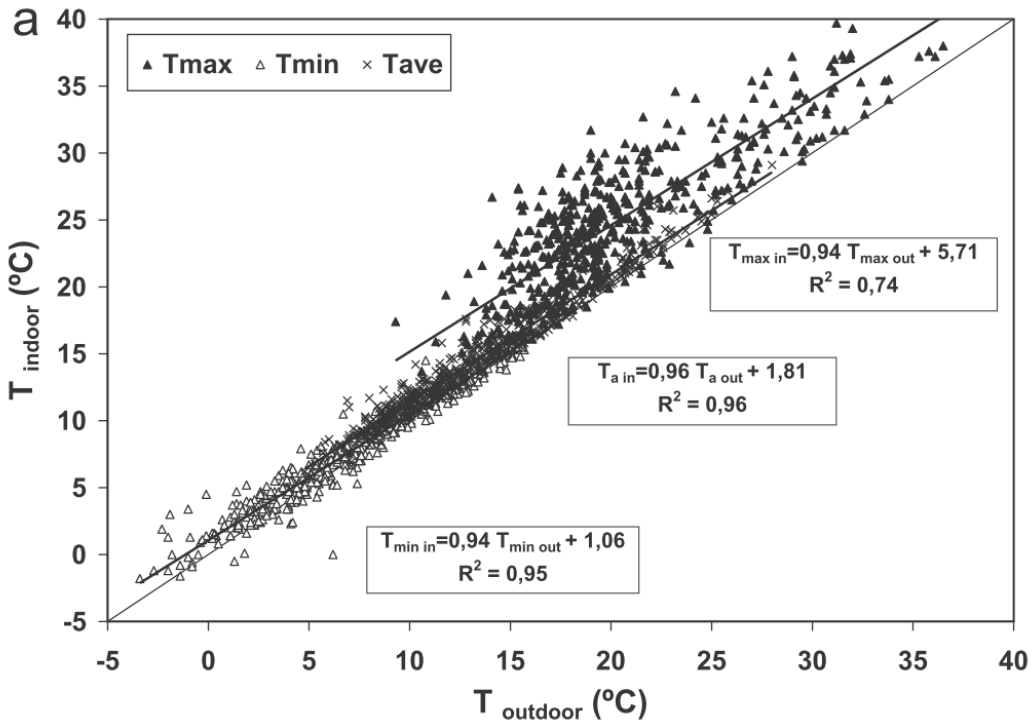


Figura 5. Comparación de la temperatura del aire máxima, mínima y media diaria entre el interior y el exterior de un invernadero en clima Mediterráneo (Fuente Gavilán *et al.*, 2015)

4. Gestión de la información de los sensores. Modalidades de riego a la demanda

El uso de electrotensiómetros está ampliamente extendido en los cultivos hortícolas intensivos del sureste español. Sin embargo, no se utilizan para realizar un riego a la demanda propiamente dicho, sino que son utilizados por el agricultor como referencia para realizar la programación de riego en los autómatas programadores. La programación se suele realizar con una periodicidad semanal. No obstante, en cualquier momento se puede volver a ajustar la programación. En la Figura 6 se observa un ejemplo de programación del riego en la que se utiliza la información de los electrotensiómetros para reprogramar (las flechas verticales muestran variaciones en la programación y/o la ejecución de riegos no programados)

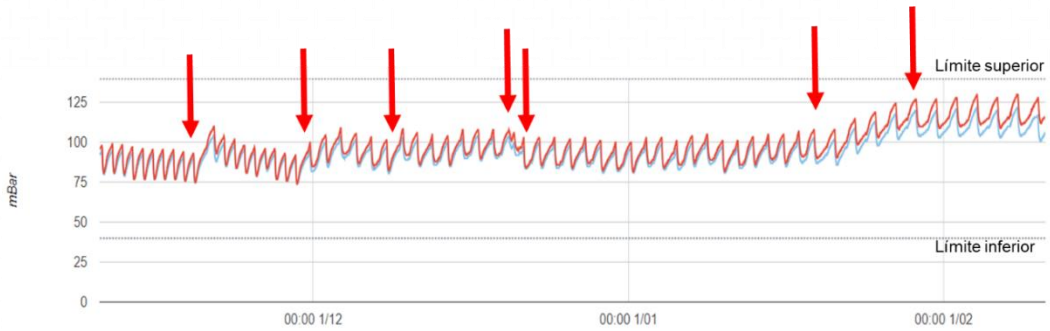


Figura 6. Evolución de la tensión matricial medida por dos electrotensiómetros utilizados como referencia para programar los riegos

Cuando se trabaja en riego a la demanda propiamente dicho la información de los electrotensiómetros se puede emplear para controlar la frecuencia y la dotación de riego.

4.1. Control de la frecuencia de riego

Utilizar la información de los sensores para controlar exclusivamente la frecuencia de riego es el sistema de trabajo más comúnmente empleado en el riego a demanda de cultivos intensivos. Para ello se determina previamente, mediante análisis en laboratorio, la curva de retención de humedad del suelo. La curva de retención de humedad relaciona los valores de tensión matricial con el contenido de humedad volumétrica del suelo. El análisis de la curva permitirá determinar de una manera aproximada el nivel de tensión matricial a partir del cual el suelo comienza a drenar (Figura 7).

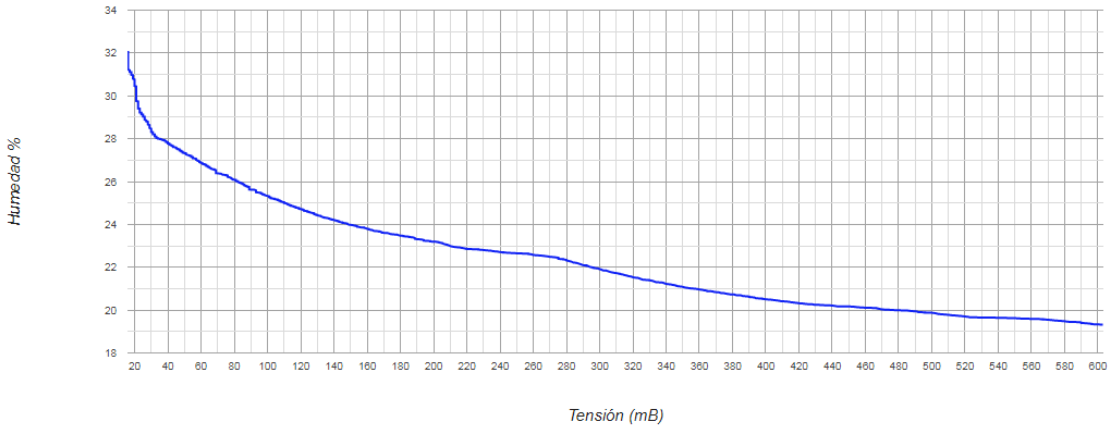


Figura 7. Curva de retención de humedad de un suelo enarenado (curva medida en secado)

Una vez analizada la curva se establece una dotación para cada pulso de riego y una consigna de activación. La consigna de activación es el nivel de tensión matricial, registrado por los electrotensiómetros, a partir del cual el autómata programador iniciará un riego. El actuador puede utilizar la información de un solo tensiómetro o la media de varios. No obstante, para simplificar la electrónica, cuando se instalan varios electrotensiómetros, se suele seleccionar solo uno de ellos como referencia de actuación. En este caso lo más adecuado sería seleccionar como tensiómetro de control aquel que presente una curva intermedia (Figura 8).

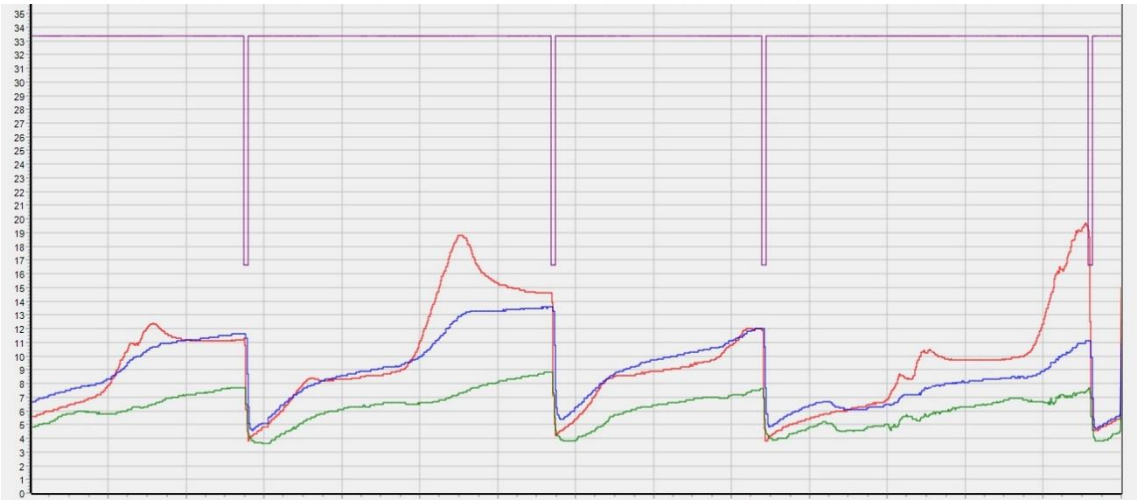


Figura 8. Tensión matricial registrada en el riego a demanda de un cultivo de pimiento, utilizando una consigna de activación de 8 kPa y una dotación de 4 L m^{-2}. El autómata registra la información de 3 tensiómetros, pero la demanda es accionada sólo por uno de ellos (Tensiómetro línea azul). Cada barra vertical corresponde a un pulso de riego.

4.2. Control de la frecuencia y dotación de riego

Los tensiómetros se pueden utilizar para ajustar la dotación de riego haciendo instalaciones por pares. Uno de los tensiómetros del par se instala en la zona radicular y el otro a más profundidad por debajo de la zona radicular (Figura 9). Para maximizar la eficiencia en el uso del agua, cuando se aplica el pulso de riego, el bulbo húmedo no debe alcanzar la cota de instalación del tensiómetro subradicular. Durante el pulso de riego y unos minutos después, la curva de tensión matricial de ese tensiómetro no debe modificarse mostrando incremento de humedad. En este caso la dotación de riego se ajusta por prueba y error. Debe ser un volumen ligeramente inferior al calculado cuando sí se observa una incipiente hidratación de dicho tensiómetro. En cambio, si lo que se pretende es dar una dotación que garantice un porcentaje de drenaje que permita el lavado de sales, el agua debe alcanzar la cota del tensiómetro subradicular al aplicar el pulso de riego. En todo caso gestionar la dotación de riego haciendo uso de los tensiómetros es bastante complejo, especialmente en suelos estratificados, como los típicos enarenados. Es por esto que se suele hacer un cálculo teórico de la dotación de riego en función de la profundidad, características del suelo y salinidad del agua, utilizándose los tensiómetros exclusivamente para gestionar la frecuencia de los riegos.

Figura 9. Tensiómetros instalados en el terreno por pares en un cultivo de pimiento. La punta de la cerámica del tensiómetro superior está instalada a 20 cm y la punta del tensiómetro inferior está a 40 cm

5. Instalación de tensiómetros en invernaderos

Antes de proceder a la instalación se decidirá el número de tensiómetros que se instalarán en cada sector de riego. Si se parte de una correcta sectorización, con sectores de riego uniformes, 2-3 puntos de monitorización pueden ser suficientes. Los puntos de monitorización pueden ser individuales o con varios tensiómetros a diferente profundidad. Una adecuada instalación de los sensores sobre el terreno será determinante para que la información obtenida tenga validez. El primer aspecto a considerar será la zona de instalación, que debe ser representativa del sector de riego. Una buena referencia puede ser a una distancia de 1/3 respecto a los límites del sector. Se debe evitar cualquier circunstancia que diferencie la zona de instalación con respecto al resto del sector: irregularidades en el terreno, sombreos, ventanas cenitales, puntos adicionales de entrada de agua, etc. Una vez elegida la zona de instalación, el punto de instalación debe ser donde se encuentre la mayor concentración de raíces del cultivo, separándose unos centímetros respecto al gotero. En cultivos herbáceos, una buena referencia podría ser: formar un triángulo equilátero de unos 10 cm de lado entre el gotero, el cuello de la planta y el tensiómetro (Figura 10). La profundidad a la que se introduce la cerámica debe ir orientada igualmente a que se instale en la zona de mayor concentración de raíces. Hay que tener en cuenta las dimensiones de la cerámica porosa, la parte superior de la misma debe quedar enterrada al menos 2-3 cm para evitar futuras descargas en el tensiómetro.

Figura 10. Punto de instalación de un electrotensiómetro en un cultivo de pimiento

Por lo que respecta a la instalación en el terreno hay que tener en cuenta que el objetivo es que la cerámica quede completamente rodeada por las partículas del suelo y microporos. Por tanto no puede haber huecos entre esta y el suelo. Para conseguirlo, en suelos sin presencia de elementos gruesos (piedras) y estructura suelta, bastará con clavar el tensiómetro en el suelo húmedo hasta la profundidad deseada. La mayor parte de los suelos de los invernaderos del sureste están enarenados y la capa de tierra fértil, que se sitúa debajo del acolchado de arena, no suelen contener elementos gruesos, pero, sin embargo, presentan una estructura endurecida. En estos suelos será necesario apartar previamente la capa de acolchado de arena

y abrir un orificio con una barrena. Se debe emplear una barrena de un diámetro igual o ligeramente inferior al del tubo del tensiómetro. Una vez abierto el agujero se llena de agua y se introduce el tensiómetro en el mismo. Posteriormente se restituye la capa de arena. El caso más desfavorable es cuando el suelo tiene piedras. En este caso además de la apertura del orificio con la barrena, se debe introducir en el mismo, antes de colocar el tensiómetro, barro diluido. Este barro se elaborará con tierra extraída de la misma zona y cribada para eliminar los elementos gruesos y la arena (Figura 11). La función del barro será sellar los huecos que queden al abrir el agujero con la barrena. Finalmente, una vez instalado el tensiómetro, haciendo uso de una bomba de vacío se extraen las burbujas de aire que pudiesen quedar en el interior del tubo, se cierra herméticamente y comienza el registro de datos.

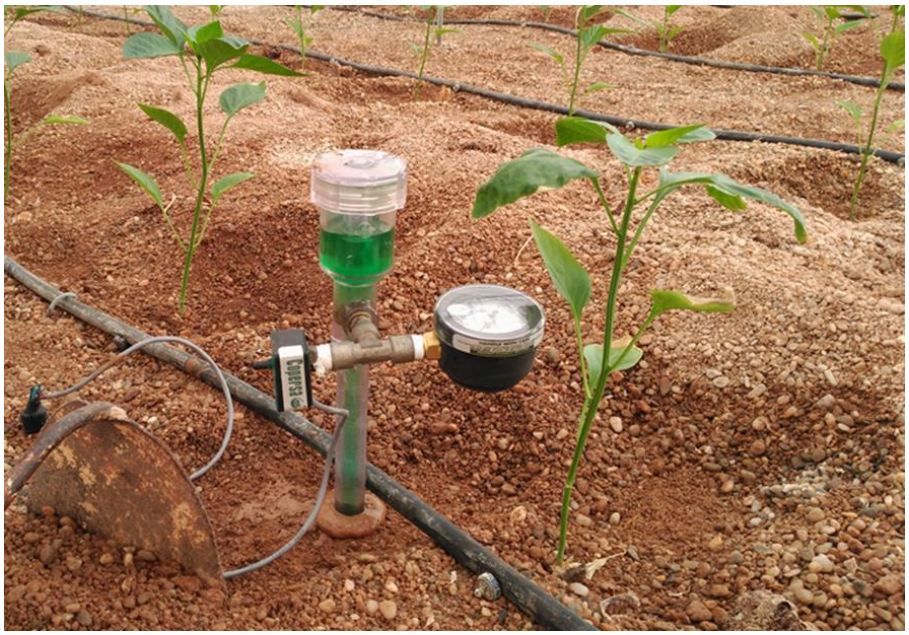


Figura 11. Aplicación de barro en el interior del orificio de instalación

6. Trabajos de riego a demanda desarrollados en el ifapa

6.1. Diseño experimental

Los trabajos se han desarrollado en un invernadero experimental de 1800 m2, situado en el Centro del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera en La Mojonera (Almería). El tipo de invernadero del ensayo es el más comúnmente utilizado por los agricultores de la zona. Se trata de un invernadero tipo "parral" con control pasivo del clima. El suelo es también el enarenado característico de la zona (Figura 12).

En este caso el espesor de los perfiles es: 5 cm en el acolchado de arena (horizonte 1) y 25-30 cm en la capa de tierra fértil aportada (horizonte 2). La textura de la tierra aportada es franco limosa. Previo al desarrollo de los ensayos se ha determinado en laboratorio la curva de retención de humedad del suelo (Figura 13).

El invernadero está equipado con doce lisímetros de drenaje de 1 m2. Los lisímetros muestran características similares a los empleados por Zotarelli (2007) en suelos arenosos y cultivos de calabacín y tomate (Figura 14).

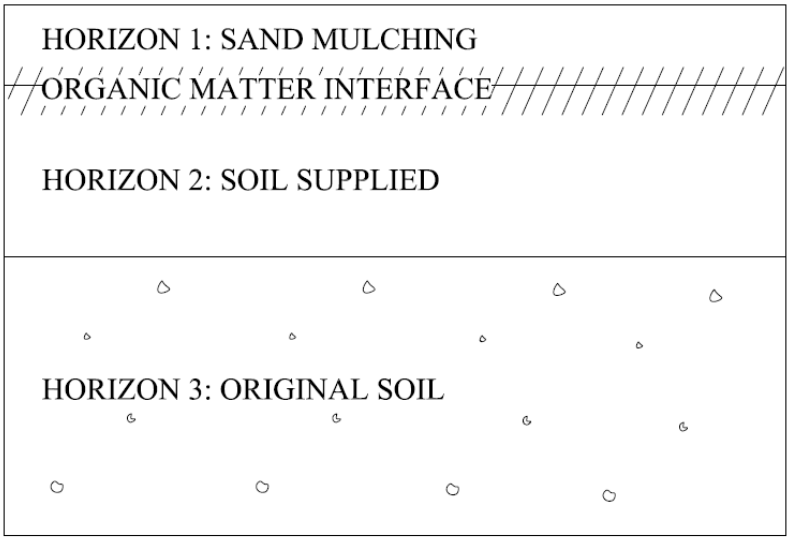


Figura 12. Perfiles de un característico suelo enarenado en el Sureste de España

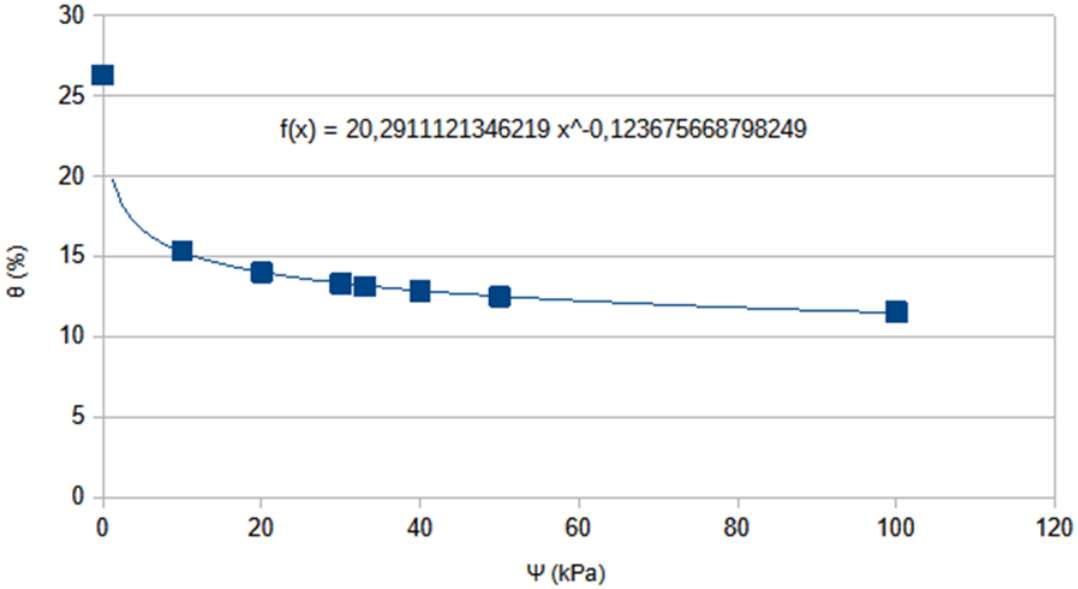


Figura 13. Curva de retención de humedad del suelo experimental

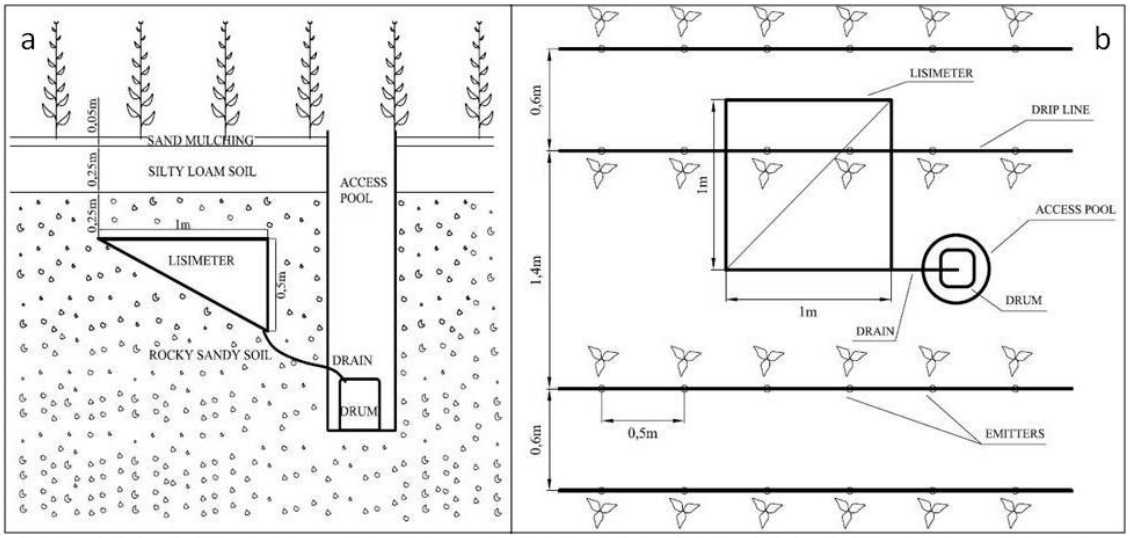


Figura 14. Lisímetros instalados (a-alzado, b-planta)

Se han desarrollado cinco ciclos de cultivo: 1 ciclo de calabacín, 3 de pimiento y 1 de tomate. En la Tabla 1 se muestran las fechas de trasplante y finalización de cada uno de estos ciclos y los marcos de plantación.

Tabla 1. Ciclos de cultivo desarrollados en el invernadero experimental

Nº de Ciclo/Fechas	Cultivo	Marco (Plantas m^{-2})
1/enero-junio 2015	Calabacín	1
2/septiem.2015-mayo 2016	Pimiento	2
3/septiem.2016-mayo 2017	Pimiento	2
4/septiem.2017-mayo 2018	Pimiento	2
5/septiem.2019-mayo 2020	Tomate	2

Se han instalado tres electrotensiómetros (Irrometer Co, inc. Riverside, Ca) por tratamiento de activación del riego e invernadero. Estos tensiómetros se han instalado sobre el lisímetro, a 15 cm de profundidad restando la capa de arena (ocupando la zona media de la capa de tierra aportada). El punto de instalación formaba un triángulo equilátero de unos 10 cm de lado entre el emisor de riego, el cuello de la planta y el tensiómetro. Los tubos de los tensiómetros se han llenado con una solución alguicida y bactericida. Los datos de todos los transductores electrónicos se han transferido a un equipo de control (Sistema Red Himarcan®). Para activar el riego en cada tratamiento se ha empleado un único electrotensiómetro de referencia. El riego se ha iniciado cuando el tensiómetro ha alcanzado la tensión matricial de referencia (consigna de activación). Independientemente de la lectura del electrotensiómetro, se ha establecido una pausa de 2 horas entre riegos del mismo tratamiento, para garantizar que el agua alcance la cerámica del tensiómetro y evitar activaciones repetidas. Al finalizar cada campaña de cultivo se han retirado los electrotensiómetros del invernadero, se han limpiado interiormente con una baqueta y se han rellenado con una solución de peróxido de hidrógeno. Se ha dejado drenar durante unas horas el peróxido de hidrógeno para que actuara limpiando los precipitados y sedimentos que pudiese contener la cerámica, se han enjuagado con agua destilada, secado y conservado, evitando la radiación solar, hasta nueva instalación. Con 24 horas de antelación a la plantación se han rehidratado los electrotensiómetros con la solución alguicida. Se han instalado al finalizar la plantación del nuevo cultivo.

Se ha utilizado una instalación de riego localizado con emisores autocompensantes y antidrenantes de 3 L h^{-1} (Emisor PCJ – Netafim®) a un marco de 2 emisores m^{-2} (espaciados a 0.5 m en la línea de goteo y 1 m entre líneas). En la Tabla 2 se muestra la composición del agua de riego utilizada.

Tabla 2. Composición del agua de riego

Ciclo	pH	E.C.	CO_3^{2-}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	$N\text{-}NO_3^-$	P	$N\text{-}NH_4^+$	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+
		dS m^{-1}	mM	mM	mM	mM	mM	mM	mM	mM	mM	mM	mM
1, 2, 3	7.71	1.42	0.00	3.30	9.24	0.47	0.15	0.00	0.00	1.70	2.43	5.00	0.08
4, 5	7,74	0,79			4,44	0,26	0,47	0,00	0,00	1,03	0,95	3,9	0,09

El cabezal de riego está equipado con un autómata programador de riego con control de pH, conductividad eléctrica y equilibrio de la solución nutritiva. Los parámetros de cada pulso de riego (solución nutritiva y tiempo de riego) se han predefinido. En cada cultivo se ha mantenido la misma solución nutritiva para todos los tratamientos. Se han aplicado soluciones nutritivas standard para los cultivos hortícolas en invernadero basadas en Camacho y Fernandez, 2008. En la Tabla 3 se muestran las soluciones nutritivas empleadas en cada ciclo cultivo.

Tabla 3. Composición de la solución nutritiva

Cultivo	NO_3^- (mM)	$H_2PO_4^-$ (mM)	SO_4^{2-} (mM)	K^+ (mM)	Ca^{2+} (mM)	Mg^{2+} (mM)
Calabacín	12	1.5	1,5	6,5	4,5	1,5
Pimiento	12	1,5	1,5	6	5	2
Tomate	11	1,5	2	7,5	5	2

Los experimentos han consistido en diferentes tratamientos de activación del riego en función de la tensión matricial del suelo (consigna de activación). En la Tabla 4 aparecen los tratamientos establecidos en cada ciclo y la dosis de riego para cada tratamiento

Tabla 4. Tratamientos establecidos en cada uno de los ciclos de cultivo

Ciclo	Cultivo	Tratamiento / Dosis de riego (kPa) / (L m^{-2})
1	Calabacín	-10/1.5, -25/2, -40/3
2	Pimiento	-10/2, -20/2, -30/2
3	Pimiento	-6/2, -10/2, -15/2, -20/2,
4	Pimiento	-6/2, -10/2, -20/2
5	Tomate	-8/3, -10/3, -20/3

Se ha registrado la tensión maticial de los tres electrotensiómetros instalados en cada tratamiento durante el ciclo completo de riego. Se ha medido el consumo de agua en cada tratamiento y el drenaje recogido en los lisímetros

Se ha determinado: la producción de fruto (kg m^{-2}) y la bioproductividad del riego (WP) (kg.m^{-3}). La WP ha sido calculada mediante la relación Pc/F, siendo Pc la producción comercial obtenida (kg.m^{-2}) y F el agua consumida en m^3.m^{-2}.

6.2. Principales resultados observados

La tecnología se ha mostrada eficaz en el control de los niveles de tensión matricial en el suelo. Se han producido frecuentes cambios en la frecuencia del riego asociados a alteraciones en la evapotranspiración del cultivo al variar las condiciones climáticas (Figura 15).

En todos los ciclos de cultivo se han alcanzado las mayores producciones cuando se trabaja con tensiones de activación de inferior valor absoluto. Por el contrario, el consumo de agua es menor cuando se trabaja con tensiones de activación de mayor valor absoluto. En estos tratamientos de menor consumo de agua se ha obtenido la mayor productividad del agua (Tabla 5).

Cuando la tensión matricial ha registrado valores inferiores a 5 kPa (en valor absoluto) se ha producido drenaje. Como consecuencia de esto, cuando se ha empleado la consigna de actuación de -6 kPa el incremento del consumo de agua ha llegado a duplicar al tratamiento de

-10 kPa. La percolación de agua hacia capas más profundas ha afectado drásticamente a la eficiencia del riego y a la productividad del agua.

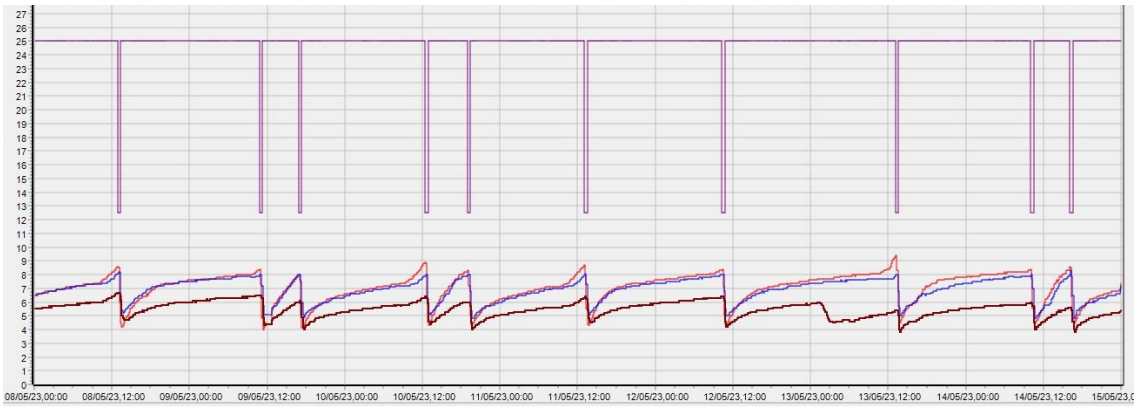


Figura 15. Tensión matricial registrada y pulsos de riego aplicados (Bandas verticales de color morado) en un periodo de 7 días

Tabla 5. Volumen de agua de riego consumida, producción obtenida y productividad del agua alcanzada en cada uno de los tratamientos de los cinco cultivos experimentales

Ciclo de cultivo	Tratamiento Kpa	Dotación de riego (L m^{-2})	Volumen total de riego (L m^{-2})	Producción (kg m^{-2})	Productividad agua (kg m^{-3})
Calabacín	T_{-10}	1,5	390	16,6 a	42,6 b
	T_{-25}	2	315	14,9 b	47,3 a
	T_{-40}	3	272	12,8 c	47,1 a
Pimiento 1	T_{-10}	2	508	9,8 a	19,3 b
	T_{-20}	2	387	9,3 a	24,0 a
	T_{-30}	2	312	7,8 b	25,0 a
Pimiento 2	T_{-6}	2	1068	7,3 a	6,8 c
	T_{-10}	2	468	6,5 a	13,9 b
	T_{-15}	2	307	5,2 b	16,9 a
	T_{-20}	2	257	4,4 b	17,1 a
Pimiento 3	T_{-6}	2	689	9,7 a	14,1 c
	T_{-10}	2	370	7,8 b	21,1 b
	T_{-20}	2	228	6,6 c	28,9 a
Tomate	T_{-8}	3	419	16.0 a	38.2 a
	T_{-10}	3	393	16.1 a	41.0 a
	T_{-20}	3	320	13.5 b	42.2 a

El análisis del comportamiento de los electrotensiómetros muestra que la amplitud diaria de la tensión matricial medida aumenta cuando se trabaja con tensiones de activación más negativas. La dispersión entre las medidas de varios sensores asociados aumenta al incrementarse el valor absoluto de la tensión matricial. La mayor disparidad de los valores de tensión matricial para un mismo tratamiento no parece consecuencia de un mal funcionamiento del electrotensiómetro, sino a que pequeñas variaciones de la humedad del suelo, cuando se encuentra más seco, suponen mayores variaciones de tensión matricial (Figura 16).

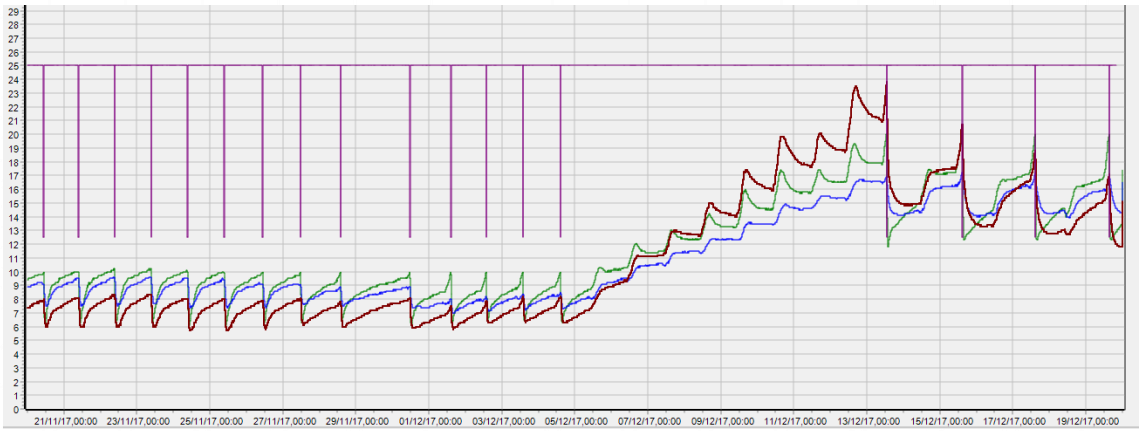


Figura 16. Tensión matricial registrada en un cultivo de pimiento. Se inició el cultivo con una consigna de activación de 10 kPa. El 5 de diciembre se modificó la consigna de activación estableciéndose en 20 kPa. La dotación de riego se ha mantenido constante durante todo el periodo (2 L h^{-1})

Bibliografía

Albaladejo-García, J. A., Martínez-Paz, J. M.; Colino, J. (2018). Evaluación financiera de la viabilidad del uso de agua desalada en la agricultura de invernadero del Campo de Níjar (Almería, España). ITEA, 114, 398-414.

Al-Ghobari, H. M.; Dewidar, A. Z. (2018). Integrating deficit irrigation into surface and subsurface drip irrigation as a strategy to save water in arid regions. Agricultural Water Management, 209, 55-61.

Baeza Cano R., Cánovas Fernández G., Alonso López F., Contreras París J.I. (2020). Uso de Tensiómetros Manuales y Electrónicos para la Gestión del Riego. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. 1-17 p. Formato digital (e-book).

Berbel J, Gutiérrez-Martín C, Expósito A. (2018). Impacts of irrigation efficiency improvement on water use, water consumptionand response to water price at field level. Agricultural Water Management 2018, 203: 423–429.

Camacho, F.F.,Fernández, E.J. (2008). Manual práctico de fertirrigación en riego por goteo. Ediciones Agrotécnicas, SL, Madrid, España.

Caparrós-Martínez, J. L., Rueda-Lópe, N., Milán-García, J., de Pablo Valenciano, J. (2020). Public policies for sustainability and water security: The case of Almeria (Spain). Global Ecology and Conservation, 23, e01037.

Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. (2020). Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas.

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J.; Gattuso, J.P. (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. Nature Climate Change, Nature Publishing Group, 2018, 8 (11), pp.972 - 980.

Cremona, M. V., Stützel, H.; Kage, H. (2004). Irrigation scheduling of kohlrabi (Brassica oleracea var. gongylodes) using crop water stress index. HortScience, 39(2), 276-279..

Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R.; Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. Journal of Hydrology, 458, 110-117.

Dukes, M. D., Simonne, E. H., Davis, W. E., Studstill, D. W.; Hochmuth, R. (2003, May). Effect of sensor-based high frequency irrigation on bell pepper yield and water use. In Proceedings of 2nd International Conference on Irrigation and Drainage, May (pp. 12-15).

Erdem, Y., Arin, L., Erdem, T., Polat, S., Deveci, M., Okursoy, H.; Gültaş, H. T. (2010). Crop water stress index for assessing irrigation scheduling of drip irrigated broccoli (Brassica oleracea L. var. italica). Agricultural Water Management, 98(1), 148-156.

Fernández, J. E. (2014). Plant-based sensing to monitor water stress: Applicability to commercial orchards. Agricultural water management, 142, 99-109..

Fernandez, J. E.; Cuevas, M. V. (2010). Irrigation scheduling from stem diameter variations: A review. Agricultural and Forest Meteorology, 150(2), 135–15

Fernandez, M.D., Gonzalez, A.M., Carreño, J., Perez, C.; Bonachela, S. (2007). Analysis of on-farm irrigation performance in Mediterranean greenhouses. Agricultural Water Management, 2007, vol. 89, issue 3, 251-260.

Gallardo, M., Arrabal, F., Padilla, F.M., Peña-Fleitas, M.T.; Thompson, R.B. (2017). VegSyst-DSS software to calculate N and irrigation requirements for seven vegetable species grown with fertigation in greenhouses in SE Spain. Acta Hortic. 1182, 65-72

Gallardo, M., Fernández, M.D., Thompson, R.B.; Magán, J.J. (2007). Productividad del agua en cultivos bajo invernadero en la costa mediterránea. Vida Rural, 259, 48- 51.

Gallardo, M., Thompson, R. B., Giménez, C., Padilla, F. M.; Stöckle, C. O. (2014). Prototype decision support system based on the VegSyst simulation model to calculate crop N and water requirements for tomato under plastic cover. Irrigation Science, 32, 237-253..

García-García, M.C., Céspedes, A.J., Lorenzo, P., Pérez-Parra, J.J., Escudero, M.C., Sánchez-Guerrero, M.C., Medrano, E., Baeza, E., López, J.C., Magán, J.J. (2016). El Sistema de Producción Hortícola de la Provincia de Almería; IFAPA (Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía): Almería, Spain, 2016; 179p.

Gavilán, P., Estévez, J.; Berengena, J. (2008). Comparison of standardized reference evapotranspiration equations in Southern Spain. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 134(1), 1-12.

Gavilán, P., Ruiz, N.; Lozano, D. (2015). Daily forecasting of reference and strawberry crop evapotranspiration in greenhouses in a Mediterranean climate based on solar radiation estimates. Agricultural Water Management, 159, 307-317.

González-Esquiva, J. M., Oates, M. J., García-Mateos, G., Moros-Valle, B., Molina-Martínez, J. M.; Ruiz-Canales, A. (2017). Development of a visual monitoring system for water balance estimation of horticultural crops using low cost cameras. Computers and Electronics in Agriculture, 141, 15-26.

Incrocci, L., Thompson, R. B., Fernandez-Fernandez, M. D., De Pascale, S., Pardossi, A., Stanghellini, C., ...; Gallardo, M. (2020). Irrigation management of European greenhouse vegetable crops. Agricultural Water Management, 242, 106393.

Jayakumar, M., Janapriya, S.; Surendran, U. (2017). Effect of drip fertigation and polythene mulching on growth and productivity of coconut (Cocos nucifera L.), water, nutrient use efficiency and economic benefits. Agricultural Water Management, 182, 87-93.

Jones, H. G. (2004). Irrigation scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of experimental botany, 55(407), 2427-2436.

Kumar, M. D., Sivamohan, M. V. K.; Narayanamoorthy, A. (2012). The food security challenge of the food-land-water nexus in India. Food security, 4, 539-556.

Lindblom, J., Lundström, C., Ljung, M.; Jonsson, A. (2017). Promoting sustainable intensification in precision agriculture: review of decision support systems development and strategies. Precision agriculture, 18, 309-331.

Lowery, B., Datiri, B. C.; Andraski, B. J. (1986). An electrical readout system for tensiometers. Soil Science Society of America Journal, 50(2), 494-496.

Marthaler, H. P., Vogelsanger, W., Richard, F.; Wierenga, P. J. (1983). A pressure transducer for field tensiometers. Soil Science Society of America Journal, 47(4), 624-627.

Melgarejo, P. Legua, P. Martínez-Nicolás, J.J., Abadía, R. (2019). Sistemas para el ahorro de agua en la Agricultura. Congreso Nacional del Agua Orihuela. Innovación y Sostenibilidad. Alacant: Universitat d'Alacant, 2019. ISBN 978-84-1302-034-1, pp 59-94.

Migliaccio, K. W., Olczyk, T., Li, Y., Muñoz-Carpena, R.; Dispenza, T. (2015). Using tensiometers for vegetable irrigation scheduling in Miami-Dade County. Agricultural and Biological Engineering Department, University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences Extension: Gainesville, FL, USA.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA). (2022). Encuesta sobre Superficies y Rendimientos de Cultivos (ESYRCE). https://www.mapa.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/boletin2022_tcm30-667379.pdf

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020). Plan Hidrológico de la Confederación Hidrográfica del Segura.

Mo, Y., Li, G.; Wang, D. (2017). A sowing method for subsurface drip irrigation that increases the emergence rate, yield, and water use efficiency in spring corn. Agricultural Water Management, 179, 288-295.

Möller, M., Tanny, J., Cohen, S., Li, Y., Grava, A., Teitel; Esquira, I. (2004). Water consumption of pepper grown in an insect proof screenhouse. Acta Hortic. 659, 569-575 DOI: 10.17660/ActaHortic.2004.659.74. https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2004.659.74

Nikolaou, G., Neocleous, D., Katsoulas, N.; Kittas, C. (2019). Irrigation of greenhouse crops. Horticulturae, 5(1), 7.

Nouri, H., Stokvis, B., Galindo, A., Blatchford, M.; Hoekstra, A. Y. (2019). Water scarcity alleviation through water footprint reduction in agriculture: the effect of soil mulching and drip irrigation. Science of the total environment, 653, 241-252.

Pardossi, A.; Incrocci, L. (2011). Traditional and new approaches to irrigation scheduling in vegetable crops. HortTechnology, 21(3), 309-313.

Pulido-Bosh, A. (2019). La sostenibilidad de los grandes acuíferos en regiones semiáridas; El caso de la Sierra de Gádor-Campo de Dalías. Congreso Nacional del Agua.

Scardigno, A. (2020). Nuevas soluciones para reducir el consumo de agua y energía en la producción de cultivos: una perspectiva del nexo agua-energía-alimentos. Opinión actual en ciencia y salud ambiental, 13, 11-15.

Schmugge, T. J., Jackson, T. J.; McKim, H. L. (1980). Survey of methods for soil moisture determination. Water Resources Research, 16(6), 961-979.

Schulz, P., Piepenburg, K., Lintermann, R., Herde, M., Schöttler, M. A., Schmidt, L. K.; Bock, R. (2021). Improving plant drought tolerance and growth under water limitation through combinatorial engineering of signalling networks. Plant Biotechnology Journal, 19(1), 74-86.

Stannard, D. I. (1986). Theory, construction and operation of simple tensiometers. Groundwater Monitoring & Remediation, 6(3), 70-78.

Takeuchi, S. (2011). Application of sap flow measurement in real time soil moisture management and examination for supplemental irrigation using automatic drip system under high atmospheric demand. Acta Horticulturae, 951, 39–45.

Takeuchi, S.; Cohen, S. (2013). Evaluating water use of Passiflora vines on pergolas and automatic irrigation management based on sap flow. Book of abstract, 9th International Workshop on Sap Flow, Poster 47.

Tejero, I., Perea, A.J., Navarro, M.J., Hernández, A., Durán-Zuazo, V.H. (2015). La Termografía de Infrarrojos para la Gestión de los Recursos Hídricos en la Agricultura. Consejería de Agricultura, Pesca y Desarrollo Rural, Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera, 1-12 p. Formato digital (e-book)

Thompson, R.B.; Gallardo, M. (2003). Programación de riegos mediante sensores de humedad de suelo en "Mejora de la eficiencia en el uso del agua en cultivos protegidos. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía.

Van Iersel, M. W., Chappell, M.; Lea-Cox, J. D. (2013). Sensors for improved efficiency of irrigation in greenhouse and nursery production. HortTechnology, 23(6), 735-746.

Warrick, A. W., Wierenga, P. J., Young, M. H.; Musil, S. A. (1998). Diurnal fluctuations of tensiometric readings due to surface temperature changes. Water resources research, 34(11), 2863-2869.

Watson, K. K.; Jackson, R. D. (1967). Temperature effects in a tensiometer-pressure transducer system. Soil Science Society of America Journal, 31(2), 156-160.

Watson, K. K., Reginato, R. J.; Jackson, R. D. (1975). Soil water hysteresis in a field soil. Soil Science Society of America Journal, 39(2), 242-246.

Zhao, W., Li, J., Yang, R.; Li, Y. (2018). Determining placement criteria of moisture sensors through temporal stability analysis of soil water contents for a variable rate irrigation system. Precision agriculture, 19, 648-665.

Zotarelli, L., Scholberg, J. M., Dukes, M. D.; Muñoz-Carpena, R. (2007). Monitoring of nitrate leaching in sandy soils: Comparison of three methods. Journal of environmental quality, 36(4), 953-962

2.5.3. La recirculación en cultivo en sustrato como estrategia para incrementar el ahorro de agua y fertilizantes

Evangelina Medrano*, Mª Cruz Sánchez-Guerrero y Pilar Lorenzo Mínguez

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Centro "La Mojonera"

* evangelina.medrano@juntadeandalucia.es

Índice

1. Introducción 213
2. Descripción del sistema de reutilización de la solución lixiviada 215
3. Evolución iónica de las soluciones nutritivas aportadas y lixiviadas 217
   3.1. Ciclo de cultivo de primavera 217
   3.2. Ciclo de cultivo de otoño-invierno 218
4. Balance hídrico y de fertilizantes 220
5. Consideraciones finales 223

Resumen

Este capítulo presenta los resultados obtenidos en cuanto a ahorro de agua y fertilizantes de dos ciclos de cultivo de pepino (primavera y otoño) en sustrato de perlita con reutilización de los lixiviados (recirculación) frente a otro cultivo sin recirculación. Así mismo se ha valorado la respuesta del cultivo de pepino en ciclo de primavera y de otoño-invierno, dos periodos climatológicamente muy distintos, lo que ha generado tasas de absorción hídricas e iónicas diferenciadas y se presenta la evolución de la concentración de iones en la solución aportada y drenada a lo largo de los dos ciclos en ambos sistemas.

1. Introducción

Se prevé que para 2080 la necesidad neta de agua para los cultivos aumentará de forma global en un 25% a pesar del incremento en la eficiencia del riego. Esto es debido al cambio en el patrón de las precipitaciones, el calentamiento global y la ampliación de los ciclos de cultivo (Fischer *et al.*, 2007). El cultivo bajo invernadero representa un ahorro de agua frente al cultivo al aire libre y un aumento en la eficiencia en el uso del agua. En la provincia de Almería, de las 32.000 ha de cultivo bajo invernadero, 3.000 ha se cultivan en sustrato de perlita y fibra de coco principalmente (García-García *et al.*, 2016). Actualmente, la mayor parte de la superficie de cultivo en sustrato se lleva a cabo en sistema abierto, es decir con liberación de la solución de lixiviación directamente al suelo. La carga iónica de la solución de drenaje es variable en función

de la calidad del agua de riego empleada, en cualquier caso, debe considerarse que se produce una pérdida de agua y fertilizantes que estos sistemas permiten fácilmente recoger y reutilizar como nueva solución nutritiva previamente reequilibrada. Por tanto, el sistema cerrado o recirculante posibilita reducir la fuente de contaminación producida por la lixiviación de iones no absorbidos por las plantas, además de mejorar la eficiencia en el uso del agua y los fertilizantes.

Nuestra agricultura utiliza mayoritariamente aguas subterráneas cuya sobreexplotación puede conducir al deterioro de la calidad de este recurso. En la actualidad se ha registrado una sobreexplotación del acuífero del Campo de Dalías de 65 hm^3 que se podría reducir a 25 hm^3 con la puesta en marcha de una desaladora en la zona (Baeza *et al.*, 2017), además se han detectado contaminaciones de nitratos en ciertas zonas como consecuencia de los elevados aportes de fertilizantes nitrogenados y orgánicos que se aplican a los cultivos (Domínguez y González, 1989).

La sensibilidad hacia el respeto y conservación del medio ambiente ha dado lugar al debate sobre la contaminación producida por la liberación de derivados de origen agrícola y a la formalización de la Directiva 91/676/CEE de diciembre, relativa a la contaminación difusa del suelo por nitratos de origen agrícola, que marca los objetivos para prevenir nuevas contaminaciones. Mediante el Real Decreto 261/1996 de 16 de febrero se transpone esta Directiva al ordenamiento español y se establece el límite de concentración de 50 mg L^{-1} de nitratos en el agua para ser consideradas contaminadas. A la presión legislativa hay que unir la presión del consumidor que prefiere productos obtenidos mediante sistemas no contaminantes.

Paralelamente, en los últimos años, en nuestro país se han llevado a cabo experiencias con el objetivo de estudiar las posibilidades de reutilización de las soluciones lixiviadas y valorar la reducción de agua y fertilizantes que suponen los sistemas cerrados; en definitiva se pretende desarrollar sistemas y estrategias que permitan un uso más eficiente del agua y los fertilizantes, a la vez que sean más respetuosos con la conservación de los recursos naturales y en general con el medio ambiente. Los aspectos más importantes para considerar cuando se reutiliza la solución de drenaje son la calidad química y biológica del agua de riego, ambos parámetros deben tenerse en cuenta a la hora de proyectar el sistema de reutilización. En los sistemas recirculantes, la solución nutritiva drenada se recupera, se desinfecta, se repone y se recicla. En comparación con el sistema de circuito abierto, requiere un control más preciso y frecuente de la solución nutritiva. La solución recirculante debe tratarse para restaurar su composición original de elementos nutrientes y eliminar cualquier sustancia extraña. Además, pueden propagarse enfermedades transmitidas por las raíces, por lo que es necesario desinfectar la solución nutritiva para eliminar los patógenos. Normalmente, la solución nutritiva se recircula hasta que la conductividad eléctrica (CE) y/o la concentración de algún ion potencialmente tóxico alcanzan un valor umbral máximo aceptable, tras lo cual se sustituye, al menos parcialmente. En los Países Bajos, se permite a los cultivadores lixiviar su sistema siempre que se alcance un límite máximo de concentración de Na^+ específico para cada tipo de cultivo: por ejemplo, 8 mmol L^{-1} para el tomate o 4 mmol L^{-1} para las rosas cortadas.

Nuestras experiencias en el centro IFAPA La Mojonera (Almería) se han orientado a desarrollar y evaluar un sistema de reutilización de la solución de lixiviación recogida de los sistemas de cultivo en sustrato. El objetivo fundamental ha sido valorar la viabilidad técnica de un sistema

sencillo de recirculación y determinar comparativamente los resultados productivos del sistema cerrado (RC) frente al sistema abierto o de drenaje libre (DL) y cuantificar la eficiencia hídrica, así como el aporte de fertilizantes a cada sistema. Se ha valorado la respuesta del cultivo de pepino en ciclo de primavera y de otoño-invierno, dos periodos climatológicamente muy distintos, lo que ha generado tasas de absorción hídricas e iónicas diferenciadas que se documentan.

2. Descripción del sistema de reutilización de la solución lixiviada

Los cultivos se han desarrollado en sustrato de perlita. Las unidades de sustrato se disponen sobre unos canales metálicos, revestidos con pintura antiácido, ubicados sobre la superficie del invernadero que presenta una pendiente del 1% para facilitar la recogida de la solución de drenaje. Todo el sistema se cubre con una lámina de polietileno coextruido, blanca y negra (Figura 1), esta lámina cumple varias funciones simultáneamente: prevención sanitaria, impide la incidencia de luz sobre la solución de drenaje y por tanto evita la formación de algas y a la vez mejora el aislamiento térmico del sustrato, tanto de los excesos que se producen en las primeras fases del cultivo antes de que la cubierta vegetal alcance un desarrollo considerable, como durante los periodos más fríos reduciendo pérdidas de energía. La composición del agua de riego utilizada se presenta en la Tabla 1.

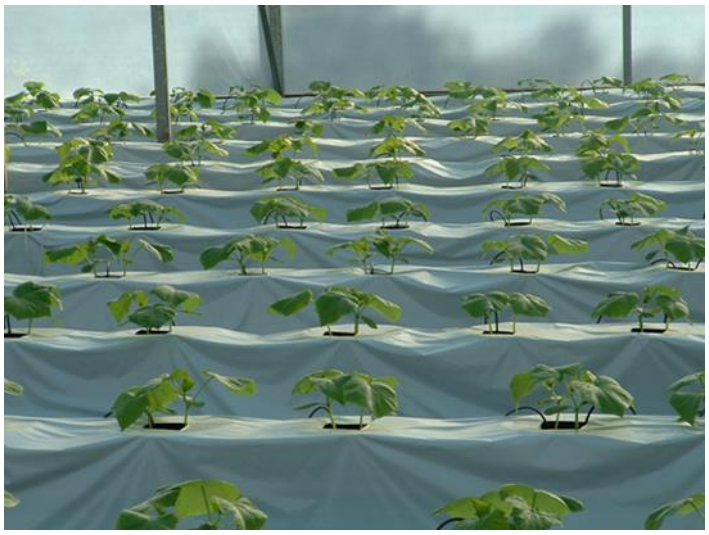


Figura 1. Vista general de la disposición del cultivo.

Tabla 1. pH, Conductividad eléctrica (CE, mS cm^{-1}) y Composición química (mmol L^{-1}) del agua utilizada

pH	CE	Na^+	K^+	Ca^{++}	Mg^{++}	Cl^-	SO_4^{--}	CO_3H^-	NO_3^-
8,12	0,35	0,78	0,15	0,89	0,41	1,00	0,13	2,20	0,05

La solución lixiviada procedente de las diferentes líneas de cultivo, por caída libre, se recoge en un depósito instalado en una caseta enterrada, para reducir las oscilaciones térmicas (Figura 2). En este tanque de recirculación la solución es diluida automáticamente con agua de riego, gracias a la actuación de dos sensores de nivel situados a distinta altura. El sensor inferior activa la entrada de agua de riego y el superior la desactiva. La distancia entre los dos sensores se calculó de manera que la Conductividad Eléctrica (CE) de la solución del depósito fuese inferior

a la CE fijada para la solución nutritiva final, para lo que hubo que tener en cuenta la CE del agua de riego disponible (0,4 mS cm^{-1}), también este parámetro fue considerado para dimensionar el tanque con objeto de disponer de un volumen adecuado que permitiera la renovación progresiva de la solución por una parte y con una ocupación razonable por otra. En este caso, la capacidad del contenedor es de 1,3 L por m^2 de superficie cultivada.

Figura 2. Tanque de recirculación donde se recoge la solución lixiviada y se diluye con agua clara (el volumen de agua utilizada se cuantifica mediante un caudalímetro). Desde este depósito la solución es impulsada al cabezal de riego

El control del riego se lleva a cabo de forma dinámica, según las necesidades en el consumo hídrico del cultivo, por medio de unas bandejas de riego a la demanda provistas de sensores de nivel e integradas en las líneas de cultivo. En el momento en el que se activa el riego, la solución del depósito de recirculación (solución lixiviada diluida con el agua de riego) es impulsada por una bomba al tanque de mezcla del cabezal de abonado donde se reequilibra la nueva solución nutritiva, ajustando la CE y el pH por medio de sensores. La proporción de inyección de fertilizantes se modifica en función de la composición nutritiva de la solución del tanque de recirculación, determinada quincenalmente. El esquema del sistema se presenta en la Figura 3.

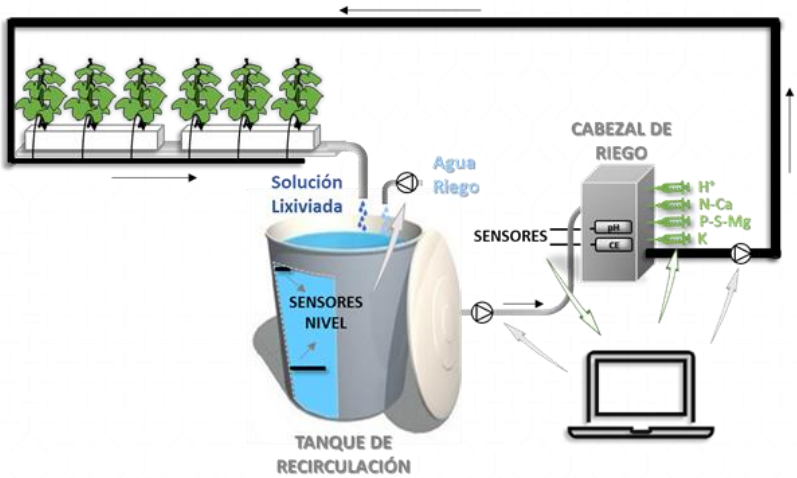
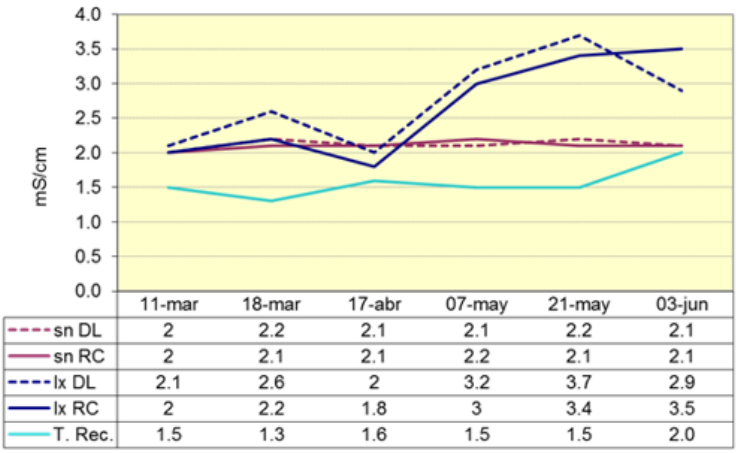


Figura 3. Esquema del sistema de recirculación evaluado

3. Evolución iónica de las soluciones nutritivas aportadas y lixiviadas

3.1. Ciclo de cultivo de primavera

La CE de las soluciones nutritivas aportadas en ambos sistemas evolucionan de forma similar como se observa en la Figura 4, se mantienen a lo largo del ciclo entre 2 y 2,2 mS cm^{-1}, mientras que la CE de la solución de drenaje es algo superior en el sistema de drenaje libre (DL), en el que se persigue mantener un potencial osmótico en el entorno de la raíz adecuado y minimizar a la vez la fracción de lixiviación. Durante el periodo de crecimiento vegetativo, caracterizado por presentar tasas altas de absorción iónica, la CE de las soluciones lixiviadas llegan a ser incluso algo inferiores a las de la solución nutritiva; durante el periodo productivo se observa un aumento de la CE que indica indirectamente una cierta reducción de la tasa de absorción mineral. Durante la mayor parte del ciclo productivo la CE de la solución diluida del tanque de recirculación se sitúa próxima a 1,5 mS cm^{-1}.



	11-mar	18-mar	17-abr	07-may	21-may	03-jun
sn DL	2	2.2	2.1	2.1	2.2	2.1
sn RC	2	2.1	2.1	2.2	2.1	2.1
lx DL	2.1	2.6	2	3.2	3.7	2.9
lx RC	2	2.2	1.8	3	3.4	3.5
T. Rec.	1.5	1.3	1.6	1.5	1.5	2.0

(1)sn DL. Solución nutritiva sistema drenaje libre

sn RC. Solución nutritiva sistema recirculante

lx DL. Solución lixiviada sistema drenaje libre

lx RC. Solución lixiviada sistema recirculante

T. Rec. Solución diluida en el tanque de recirculación

Figura 4. Evolución de la Conductividad eléctrica (CE, mS cm^{-1}), durante el ciclo de primavera, en las diferentes soluciones (1)

La evolución de los iones NO_3^-, K^+ y Ca^{++} se presentan en la Figura 5. Sus concentraciones en la solución nutritiva aportada de ambos sistemas DL y RC han sido semejantes. Cuando se observa la evolución de la concentración de estos iones en el tanque de recirculación se pone en evidencia la reducción de aporte de estos fertilizantes necesario para reajustar la nueva solución nutritiva con respecto al sistema de drenaje libre.

En el sistema recirculante la concentración de NO_3^- en la solución lixiviada es inferior a la del sistema abierto, lo mismo que sucede con la CE. Las concentraciones de NO_3^- y K^+ en las soluciones nutritivas DL y RC son semejantes y superiores a las obtenidas en las soluciones lixiviadas durante parte del ciclo de cultivo, especialmente durante la fase de crecimiento vegetativo. Las concentraciones de Ca^{++} en las soluciones lixiviadas durante la fase de crecimiento vegetativo adoptan valores parecidos a las soluciones nutritivas, mientras que durante la fase generativa tienden a acumularse por lo que la concentración en el tanque recirculante es similar a la establecida en la solución nutritiva y se minimiza el gasto de dicho fertilizante en el sistema recirculante.

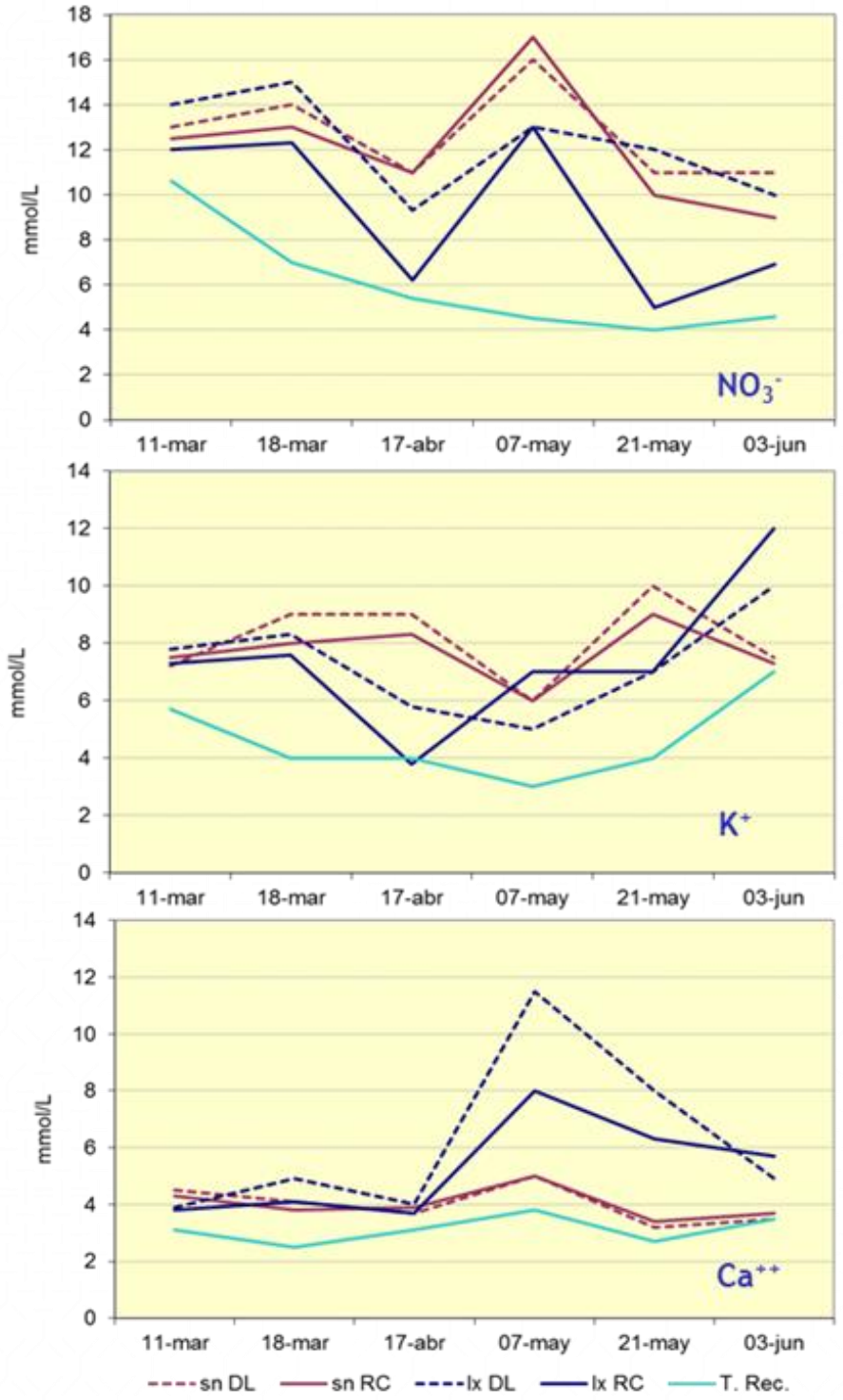


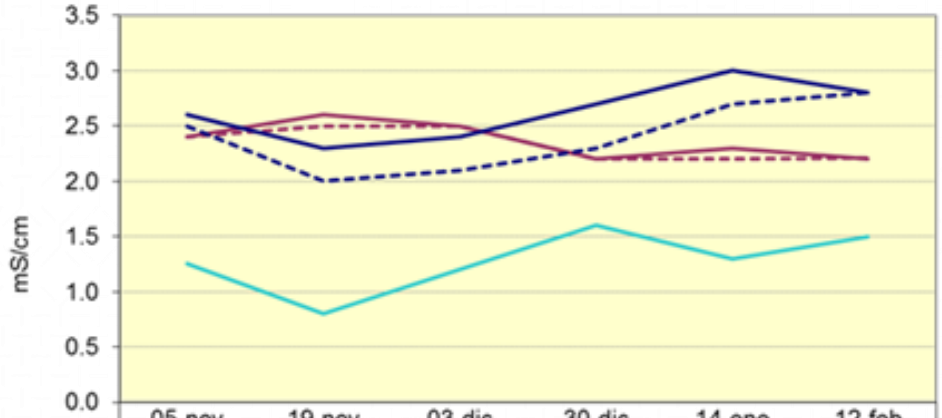
Figura 5. Evolución de la concentración de los iones nitrato, potasio y calcio durante el ciclo de primavera, en las diferentes soluciones

3.2. Ciclo de cultivo de otoño-invierno

La CE de la solución nutritiva se presenta en la Figura 6, donde se observa la misma evolución en los dos sistemas, abierto y cerrado. El parámetro se sitúa entre 2,2 y 2,6 mS cm^{-1}, valores ligeramente superiores a los del ciclo de cultivo de primavera. La CE de la solución lixiviada se

mantiene durante todo el cultivo entre 2 y 3 mS cm^{-1} en ambos sistemas, mientras la CE en el tanque de recirculación alcanza el valor máximo de 1,6 mS cm^{-1} lo que ha permitido durante todo el ciclo tener la amplitud suficiente para ajustar la solución nutritiva en el sistema cerrado.

La evolución de los iones NO_3^-, K^+ y Ca^{++} se presentan en la Figura 7. La concentración del ion NO3- en la solución nutritiva es superior a los valores que se aportan en el cultivo de primavera. Durante el periodo vegetativo la concentración de NO_3^- en las soluciones de lixiviación son inferiores a las de la solución nutritiva, coincidiendo con una fase en la que se producen altas tasas de crecimiento foliar asociadas a alta absorción iónica; con el desarrollo del fruto la concentración de NO_3^- en la solución de lixiviación aumenta y la fracción contenida en el tanque de recirculación representa una fuente considerable de este fertilizante.



	05-nov	19-nov	03-dic	30-dic	14-ene	12-feb
sn DL	2.4	2.5	2.5	2.2	2.2	2.2
sn RC	2.4	2.6	2.5	2.2	2.3	2.2
lx DL	2.5	2.0	2.1	2.3	2.7	2.8
lx RC	2.6	2.3	2.4	2.7	3.0	2.8
T. Rec.	1.25	0.8	1.2	1.6	1.3	1.5

Figura 6. Evolución de la Conductividad eléctrica (CE) durante el ciclo de otoño-invierno, en las diferentes soluciones

La evolución de la concentración de K^+ en las soluciones nutritivas es semejante en ambos sistemas DL y RC y los niveles se sitúan entre 6 y 9 mmol L^{-1} durante el ciclo. La concentración de K^+ en la solución lixiviada presenta una pauta relacionada con el desarrollo característico del cultivo, observándose los valores superiores cuando se produce el desarrollo de los frutos que entran en competencia por los asimilados con la fracción foliar. De nuevo la concentración de K^+ en el tanque de recirculación que alcanza 4,1 mmol L^{-1} permite reducir el aporte de K^+ en el sistema recirculante respecto al sistema abierto.

La concentración de Ca^{++} de la solución nutritiva y de las lixiviadas en ambos sistemas es muy similar, esto significa que se mantiene una misma tasa de absorción a lo largo del ciclo. En el último periodo se ha incrementado la concentración de Ca^{++} en la solución nutritiva para favorecer su absorción coincidiendo con una fase en la que la demanda evaporativa del aire en el interior del invernadero es baja y la tasa de transpiración y asimilación están muy reducidas, propias de la ontogenia del dosel vegetal.

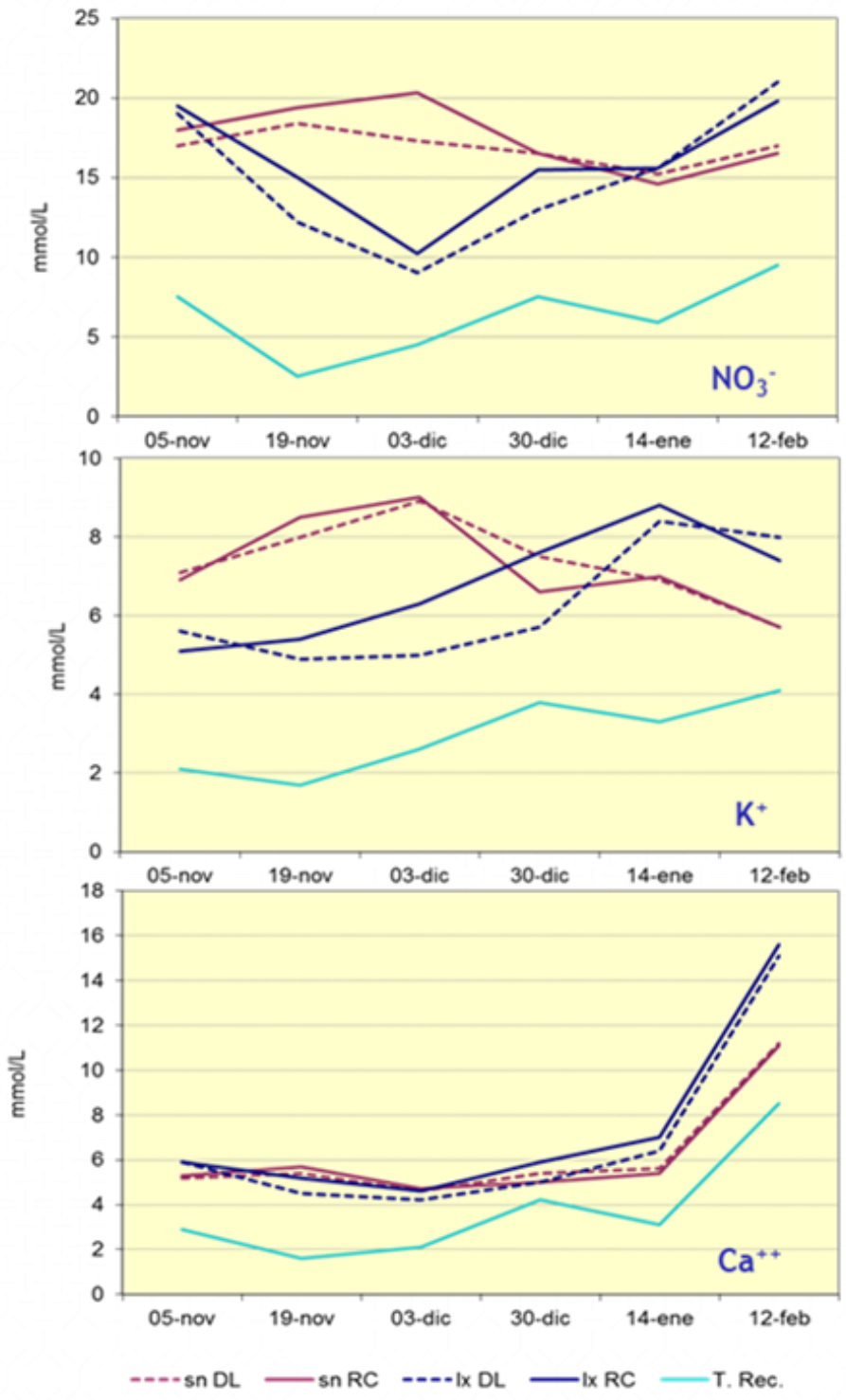


Figura7. Evolución de la concentración de los iones nitrato, potasio y calcio durante el ciclo de otoño-invierno, en las diferentes soluciones

4. Balance hídrico y de fertilizantes

El contenido relativamente bajo de los iones Cl^- y Na^+ en el agua de riego (1,5 mmol L^{-1}) ha permitido reutilizar toda la solución lixiviada generada a lo largo de los ciclos de cultivo sin que se hayan producido acumulaciones excesivas de estos iones que nunca han superado la

concentración de 6 mmol L^{-1}. Se ha comparado el aporte de agua requerido en el sistema abierto y cerrado. En la Figura 8 se presenta la evolución del gasto de agua por periodos de 10 días y el acumulado durante el ciclo de primavera; se observa un aumento progresivo durante la primera fase, relacionado con el incremento de la superficie foliar, hasta alcanzar los valores más altos que superan los 5,5 L m^{-2} y día. En el sistema cerrado el aporte necesario es inferior debido a que la fracción de lixiviación se recupera y, por tanto, entra de nuevo en el sistema. Al final del ciclo de primavera el sistema abierto ha requerido un aporte de 361 L m^{-2} y el sistema cerrado 313 L m^{-2}.

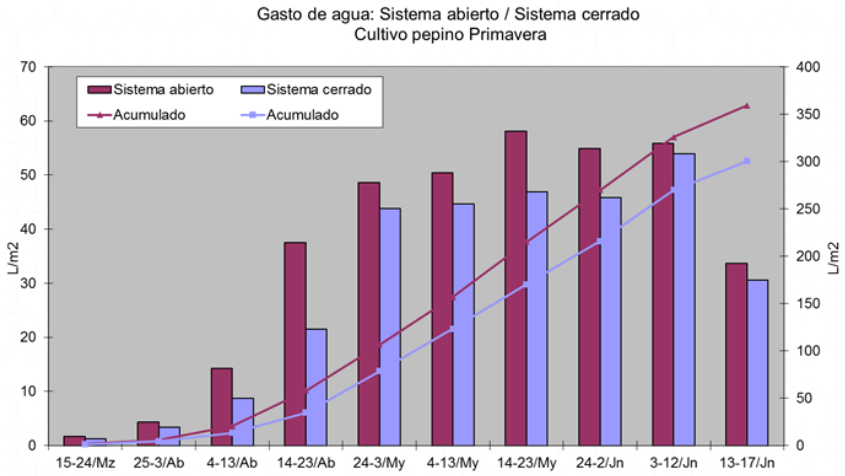


Figura 8. Volumen de agua aportado (L m^{-2}) por periodos de 10 días y acumulado durante el periodo de primavera en los sistemas abierto y cerrado

En el ciclo de otoño-invierno se observa una reducción considerable en el gasto de agua respecto al ciclo de primavera, relacionado con las condiciones ambientales. En este periodo la demanda evaporativa de la atmósfera del invernadero es más baja y por tanto la tasa de transpiración del dosel vegetal se reduce considerablemente también, por lo que el aporte acumulado al final del ciclo es de 239 L m^{-2} en el sistema abierto y 161,1 L m^{-2} en el sistema cerrado, con consumos estacionales máximos en torno a los 3 L m^{-2} y día (Figura 9).

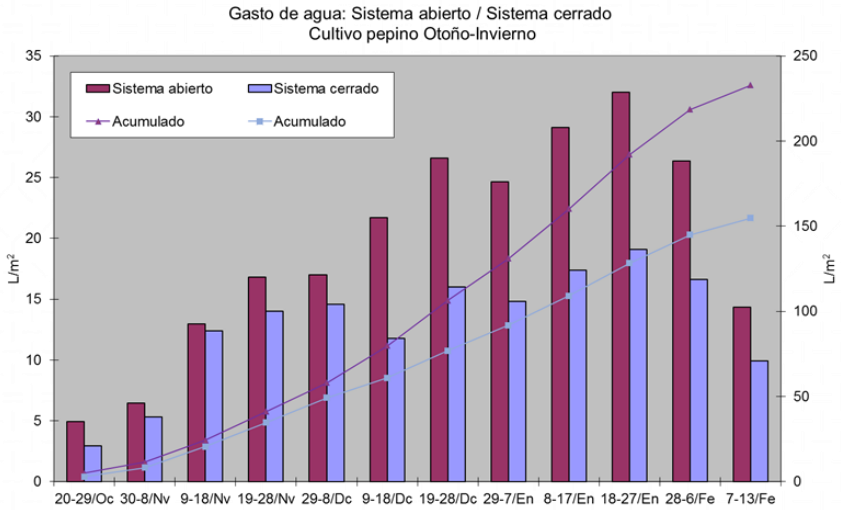


Figura 9. Volumen de agua aportado (L m^{-2}) por periodos de 10 días y acumulado durante el periodo de otoño-invierno en los sistemas abierto y cerrado

Como se observa en las Tablas 2 y 3, el ahorro de agua en el sistema cerrado respecto al abierto es sustancial : el 13 % en el ciclo de primavera y del 33% durante el ciclo de otoño-invierno. Estos porcentajes equivalen a un ahorro de 479 m^3 ha^{-1} y 778 m^3 ha^{-1} respectivamente.

Tabla 2. Gasto de agua y fertilizantes en los sistemas abierto y cerrado durante el ciclo de primavera

		Gasto abono		Gasto agua	
		$Ca(NO_3)_2$	KNO_3		
Sistema abierto	kg ha^{-1}	2.504	2.861	m^3 ha^{-1}	3.614
Sistema cerrado	kg ha^{-1}	476	997	m^3 ha^{-1}	3.135
		Ahorro abono		**Ahorro de agua**	
	kg ha^{-1}	2.028	1.864	m^3 ha^{-1}	479
	%	**81**	**65**		**13**

Tabla 3. Gasto de agua y fertilizantes en los sistemas abierto y cerrado durante el ciclo de otoño-invierno

		Gasto abono		Gasto agua	
		$Ca(NO_3)_2$	KNO_3		
Sistema abierto	kg ha^{-1}	2.229	1.718	m^3 ha^{-1}	2.388
Sistema cerrado	kg ha^{-1}	799	853	m^3 ha^{-1}	1.610
		Ahorro abono		**Ahorro de agua**	
	kg ha^{-1}	2.028	865	m^3 ha^{-1}	778
	%	**64**	**50**		**33**

En relación con los fertilizantes utilizados en ambos sistemas, se ha cuantificado un ahorro considerable en el sistema con reutilización de lixiviados; como evidencian las tablas 2 y 3 la reducción de 2.028 y 1.864 kg ha^{-1} de nitrato cálcico y nitrato potásico, obtenidas durante el ciclo de primavera, equivalen a un ahorro de estos fertilizantes del 81 y 65 % respectivamente. Durante el ciclo de otoño-invierno la reducción es considerable, aunque inferior a la del ciclo de primavera, 1.430 y 865 kg ha^{-1} de nitrato cálcico y nitrato potásico que representan un ahorro del 64 y 50 % respectivamente respecto al sistema con drenaje libre.

La producción de pepino comercial en ambos ciclos de cultivo no mostró diferencias significativas entre el sistema abierto y recirculante (Tabla 4): 15,5 y 17,4 kg m^{-2} respectivamente en el ciclo de primavera y 11,5 y 12,1 kg m^{-2} en el de otoño-invierno; por tanto se produce un importante incremento de la eficiencia en el uso del agua sobre la producción de fruto del sistema cerrado o recirculante (Tabla 4), siendo de 55,5 y 75,2 g L^{-1} en primavera y otoño-invierno respectivamente, comparado con la eficiencia del sistema con drenaje libre de 42,9 y 48,1 g L^{-1} en los ciclos de primavera y otoño-invierno.

Tabla 4. Producción comercial de fruto (kg m^{-2}) y eficiencia en el uso del agua en relación a la producción de fruto (g L^{-1})

	Primavera		Otoño - Invierno	
	kg m^{-2}	g L^{-1}	kg m^{-2}	g L^{-1}
Sistema abierto	15,5	42,9	11,5	48,1
Sistema cerrado	17,4	55,5	12,1	75,2[1]

5. Consideraciones finales

La valoración del sistema de reutilización de la solución lixiviada indica que este sistema sencillo muestra viabilidad técnica, al alcanzar una productividad similar a la obtenida por el sistema de drenaje libre.

La calidad del agua de riego disponible ha permitido diluir la solución lixiviada y gestionar el reequilibrio de la nueva solución nutritiva con un manejo muy simple, basado en un análisis quincenal de la composición de la solución del tanque de recirculación para establecer la inyección de fertilizantes. La recuperación de toda la solución de lixiviación a lo largo de los ciclos de cultivo genera un incremento de la eficiencia hídrica del 29 y 56 % en el ciclo de primavera y otoño-invierno respectivamente.

Cuando el nivel de salinidad del agua de riego sea superior, será necesario el descarte de cierto volumen de lixiviado para evitar acumulaciones excesivas de sales por lo que se reducirá la eficiencia en el uso del agua, dependiendo de la tolerancia a la salinidad del cultivo con el que se trabaje. Por otra parte, a nivel productivo habría que considerar la instalación de un sistema de desinfección de la solución recirculante para evitar la propagación de enfermedades.

Finalmente resaltar el gran ahorro de fertilizantes que compensará a largo plazo la inversión realizada en el sistema de recirculación, así como, los beneficios medioambientales en cuanto a la reducción en el consumo de agua y en la contaminación por fertilizantes.

Bibliografía

Baeza, R.; Alonso, F.; Parra, M.M.; Contreras, J.I. (2017). Caracterización de los recursos hídricos disponibles y de sus mezclas para el riego de cultivos hortícolas intensivos en el Campo de Dalías. Actas de Horticultura SECH, 77: 273-280.

Domínguez, P.; González, A. (1989). Sistema hidrogeológico del Campo de Dalías (Almería). Propuestas de actuaciones de investigación y gestión. Instituto Tecnológico Geominero de España. Ministerio de Industria y Energía. 177pp.

Fischer, G.; Tubiello, F.N.; Van Velthuizen, H.; Wiberg, D.A. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements: Effects of mitigation, 1990–2080. Technol. Forecast. Soc. Chang. 74, 1083–1107.

García-García, M.C.; Céspedes, A.J.; Lorenzo, P.; Pérez-Parra, J.; Escudero, M.C.; Sánchez-Guerrero, M.C.; Medrano, E.; Baeza, E.; López, J.C.; Magán, J.; Fernández, M.; Parra, S.; Meca, D.E.; Gázquez, J.C.; García, R. (2016). El sistema de producción hortícola de la Provincia de Almería. https://ifapa.junta-andalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/05ca752a-b1ff-4e6a-8c77-d706f90f20bc

Agri-OsmoZ: ¿Hacia una revolución agrícola?

Frente a los crecientes desafíos de la agricultura moderna, Agri-OsmoZ de KEPWATER ENGINEERING se presenta como una solución prometedora y revolucionaria. Producto 100% natural, certificado Orgánico y Tüv, actúa como un hidro-retenedor de una eficiencia sin precedentes, reduciendo el consumo de agua en un promedio del 50% al tiempo que estimula el crecimiento de las plantas.

Se evoca la peculiaridad de la "fabricación de agua". Agri-OsmoZ es una ayuda para la degradación de sustancias orgánicas. Al proporcionar una microbiota más propicio para el establecimiento y desarrollo de microorganismos, contribuye a la rápida implantación y desarrollo de microorganismos. Es esta descomposición la que libera jugos ricos en minerales y agua. Por lo tanto, los volúmenes de agua "producidos" estarán directamente relacionados con la calidad del microbioma.

Agri-OsmoZ es una reversión de 10 años, una vez que el producto esté en el suelo, permanecerá activo. Sin embargo, recomendamos una aplicación de mantenimiento cada 6 años y una adición de materia orgánica cada año.

Agri-OsmoZ aborda los principales desafíos de la agricultura moderna

Escasez de agua: Al reducir a la mitad el consumo de agua de riego, Agri-OsmoZ ayuda a preservar los recursos hídricos y a hacer frente al creciente estrés hídrico.

Cambio climático: Al aumentar la resistencia de las plantas a los estreses ambientales (calor, sequía, salinidad), Agri-OsmoZ garantiza la sostenibilidad de los cultivos y minimiza el riesgo de pérdidas de rendimiento.

Calidad del suelo: Al mejorar la estructura y la fertilidad del suelo, Agri-OsmoZ promueve el crecimiento de las plantas y la producción de alimentos saludables y nutritivos.

Desarrollo sostenible: Reestructuración del suelo y reactivación de un ecosistema equilibrado, Agri-OsmoZ forma parte de un enfoque de la agricultura más respetuoso con el medio ambiente.

Además de sus beneficios ambientales, Agri-OsmoZ tiene muchos beneficios económicos para los agricultores:

Reducción de los costes de riego: La reducción del consumo de agua se traduce en un ahorro sustancial en la factura del agua y la energía.

Aumento de los rendimientos: El aumento del crecimiento de las plantas y la mejora de la resistencia a las enfermedades y al estrés dan como resultado cosechas más abundantes y de mayor calidad.

Agri-OsmoZ es un producto fácil de usar que es compatible con todo tipo de cultivos y suelos.

Se presenta en forma de polvo granular que es fácil de mezclar con tierra o sustrato. Son La aplicación no requiere ningún conocimiento especial y puede ser llevada a cabo por todos los agricultores, independientemente del tamaño de su explotación.

Agri-OsmoZ se utiliza en muchas áreas

Agricultura: Optimización del riego, reducción de los costes operativos, aumento de los rendimientos y de la calidad de los cultivos, mejora de la fertilidad del suelo.

Plantación de árboles y viveros: Mejora de la supervivencia de las plantas, aceleración del crecimiento de las raíces, reducción de las necesidades de agua y energía.

Trasplante: Disminución del shock del trasplante, aumento de la tasa de éxito, aumento de la resistencia al estrés ambiental.

Paisajismo: Mejora del enraizamiento de plantas y arbustos, reducción del mantenimiento de los espacios verdes, creación de paisajes más sostenibles, ahorro de agua y energía.

Kepwater, la empresa detrás de Agri-OsmoZ, se compromete a apoyar a los agricultores en la transición hacia una agricultura más sostenible.

Método de uso del producto

Agricultura industrial: cereales, colza, girasol, etc., el producto se aplicará con un esparcidor tradicional, rasque el suelo antes de extenderlo de 15 a 20 cm de profundidad.

Plantaciones existentes: frutales, olivos, etc., recomendamos enterrar Agri-OsmoZ con materia orgánica entre 20 y 30 cm de profundidad.

Viveros: mezclar con el sustrato 20 a 30% por 1 m3 de sustrato.

En conclusión, Agri-OsmoZ representa una gran innovación para la agricultura del mañana.

Este producto 100% natural con múltiples beneficios ofrece una solución concreta y sostenible a los retos de la agricultura moderna.

No dude en ponerse en contacto con Kepwater para saber cómo Agri-OsmoZ

Contacto

KEPWATER ENGINEERING

Agri-OsmoZ®

Juntos por un futuro fértil y sostenible

AgroHydro-Kepwater SL.
Pol. Ind. Can Mora, C/África 11
08459 Sant Antoni de Vilamajor (Barcelona)
España
e-mail: info@kepwater.com
https: www.kepwater.com
Persona de contacto: Daniel BOU
Telefono: +34 609729538

NEPTUNE N

Neptune® N es la tubería de goteo ligera con gotero de pastilla ideal para cultivos estacionales al aire libre.

- Alta eficiencia que permite un riego uniforme a lo largo de toda la línea de goteo
- Alta resistencia a la obturación gracias al gotero de flujo turbulento con amplios pasajes
- Orificio de salida realizado con tecnología mecánica de precisión
- Filtro de entrada en el gotero que impide que los depositos de sedimento entren en el gotero

TORO®

www.toro-ag.it
www.toro.com

@Toro Italia

@isesrl

@ISEontheweb

2.6. Programación del riego de los cultivos hortícolas extensivos

Natividad Ruiz* y Pedro Gavilán

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Centro "Alameda del Obispo"

* natividad.ruiz.baena@juntadeandalucia.es

Índice

1. Introducción 227
2. Estimación de las necesidades hídricas 228
   2.1. Evapotranspiración de cultivo de los hortícolas extensivos 228
3. Programación del rigo 231
   3.1. Programación del riego basada en el balance de agua en el suelo 231
   3.2. Estrategias de riego 235
   3.3. Ejercicio de programación del riego en un cultivo de patata 236
4. Lavado de sales y uso de aguas salinas 239
5. Avances sobre la programación del riego 241

Resumen

En este capítulo se describe cómo se estiman las necesidades de agua de los cultivos hortícolas al aire libre, y se centra en el desarrollo conceptual y práctico de la metodología del balance de agua en el suelo como método para realizar la programación del riego. Se acompaña de un ejemplo práctico que explica con detalle cada variable que forma parte de la ecuación del balance de agua, obteniendo el tiempo de riego final en un cultivo de patata regado por aspersión. Además, se profundiza en la problemática de la salinidad y su afección en la programación del riego de estos cultivos. Por último, se describen brevemente los avances en la programación eficiente del riego.

1. Introducción

La superficie de cultivos hortícolas en Andalucía alcanza las 130.000 ha de superficie y una producción cercana a los 6,6 millones de toneladas. Entre las especies más sobresalientes se encuentran: col, melón, espárrago, calabaza, calabacín, lechuga, pepino, sandía, berenjena, tomate, coliflor, pimiento, ajo, fresón, cebolla, alcachofa, zanahoria, y judías, guisantes y habas verdes (CAGPDS, 2020). Todas ellas se cultivan con sistemas de riego, fundamentalmente a presión, ya sea riego localizado (microaspersión o goteo) o riego por aspersión.

Los avances tecnológicos en el sector del regadío y la mejora de las infraestructuras ligadas a la modernización de este permiten alcanzar un alto nivel de precisión en el manejo de las instalaciones de riego. Ante la escasez de recursos hídricos, se hace necesaria una gestión adecuada del riego que estime de manera precisa las demandas hídricas y adecúe los volúmenes de riego a las mismas. De esta forma se conseguirá un mejor uso del agua desde el punto de vista productivo y medioambiental.

El conocimiento de las necesidades de agua de los cultivos (ET_c) permite establecer la cantidad de agua que consume la planta y el ritmo en que se produce esta pérdida. De aquí la trascendencia de conocer este valor para realizar una eficiente programación del riego. Diferentes estudios han profundizado en las necesidades de riego y nutrientes como el nitrógeno, en cultivos hortícolas al aire libre como la lechuga, espinaca y tomate de industria (Giménez *et al*., 2019), adaptando modelos como VegSyst, un modelo para hortícolas en invernadero (Gallardo *et al.* 2016), a especies cultivadas al aire libre.

Todavía, agricultores y técnicos encuentran dificultad para realizar una adecuada programación del riego que les permita optimizar el agua, por lo que habitualmente recurren a su experiencia, lo que en ocasiones provoca sobreestimaciones de las necesidades reales del cultivo. A esta situación habría que añadir que en la mayoría de las explotaciones no se realizan evaluaciones periódicas de los sistemas de riego, por lo que no se llega a conocer la uniformidad de distribución del sistema de riego, parámetro relevante en la estimación de la eficiencia de la aplicación del agua de riego (Lozano *et al.,* 2020).

En este capítulo se describirán las diferentes estrategias de programación del riego, centrándose en las bases conceptuales del balance de agua en el suelo, que es la metodología más ampliamente utilizada para determinar las cantidades óptimas de riego que necesita un cultivo.

2. Estimación de las necesidades hídricas

2.1. Evapotranspiración de cultivo de los hortícolas extensivos

El consumo de agua por el cultivo dependerá tanto de la especie como de la climatología de la zona, en especial de las condiciones de radiación solar, temperatura y humedad relativa del aire y velocidad del viento dominante. Las relaciones que existan entre el suelo, el agua, la planta y el clima son esenciales para manejar un determinado sistema de riego ya que de ellas depende el movimiento del agua en el suelo y en la planta, así como el proceso de la transpiración. La cantidad de agua que supone la transpiración y la evaporación suele considerarse de forma conjunta ya que es difícil calcularla por separado. Por lo tanto, se considera que las necesidades de agua de los cultivos están representadas por la suma de la evaporación directa de agua desde el suelo más la transpiración de las plantas, en lo que se denomina evapotranspiración del cultivo (ET_c), que suele expresarse en milímetros de altura de agua evapotranspirada en cada día (mm/día).

Existen diferentes procedimientos que miden directamente el valor de la ET_c, pero requieren del uso de instrumental con un alto componente tecnológico, por lo que resulta bastante costoso y por ello, prácticamente, sólo se realiza en el ámbito de la investigación. Entre ellos se citan los

lisímetros gravimétricos y los de drenaje, y el método de la Relación de Bowen-Balance de Energía y el de Covarianza de Torbellinos.

Dada la dificultad, tanto técnica como económica, de obtener mediciones directas y exactas en condiciones reales, es fundamental disponer de métodos empíricos que estimen su cuantía. Estos métodos utilizan como variables los factores climáticos y de cultivo que determinan la evapotranspiración.

El factor climático hace referencia a la Evapotranspiración de Referencia (ET_o), que se define como la tasa de evapopotranspiración de una pradera de una altura determinada, con cobertura total del suelo y un suministro ilimitado de agua y nutrientes (Allen *et al*., 2006). El valor de ET_o expresa la capacidad evaporativa de la atmósfera para una determinada ubicación y época del año, por lo que es una variable fundamentalmente climática. La ecuación principal para el cálculo de ET_o es la de Penman-Monteith adaptada por la FAO, aunque la ecuación de Hargreaves se puede utilizar cuando sólo se dispone de datos de temperatura del aire. Varias metodologías han sido usadas para calcular la ET_o. Las más frecuentes están basadas en el uso de datos meteorológicos históricos o de días anteriores (Hanson, 1996), mientras que otras utilizan el pronóstico meteorológico (Cai *et al.,* 2007). Datos diarios e históricos de ET_o se encuentran disponibles en las más de 100 estaciones agroclimáticas distribuidas por la geografía andaluza (https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/riaweb/web/) y en la página web de la Red SIAR (www.siar.es) para el territorio nacional. En España, el Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación ha supuesto uno de los grandes avances para mejorar el manejo del riego en los últimos veinte años. La red SIAR, con 468 estaciones meteorológicas automáticas, suministra valores diarios de ET y precipitación para la programación de riegos (Figura 1). En Andalucía, la red SIAR dispone de 100 estaciones meteorológicas.

Figura 1. Estaciones meteorológicas de la Red SIAR (www.siar.es)

La influencia de los factores no climáticos que determinan la evapotranspiración de un cultivo, es decir, los relacionados con el cultivo propiamente dicho, el suelo y otros factores que puedan afectar a su crecimiento (salinidad, estrés hídrico o ambiental), se incluyen en el coeficiente de cultivo (K_c) y otros coeficientes correctores como el coeficiente de estrés hídrico (K_s) (Allen *et*

al., 2006). El K_c se usa para estimar la ET_c en condiciones óptimas, es decir, cuando el cultivo no se ve afectado por estrés hídrico, condiciones ambientales desfavorables, plagas o enfermedades. De esta forma, el procedimiento propuesto por Doorenbos y Pruitt (1977) establece el cálculo de la evapotranspiración de un cultivo (ET_c), mediante el producto de la evapotranspiración de referencia (ET_o) y del coeficiente de cultivo (K_c) (Ec.1).

$$ET_c = ET_0 \times K_c \text{ (Ec. 1)}$$

Puesto que el estado de desarrollo del cultivo de referencia se considera constante, K_c irá variando (Figura 2) en función del ciclo biológico de la especie cultivada (Allen *et al*., 2006).

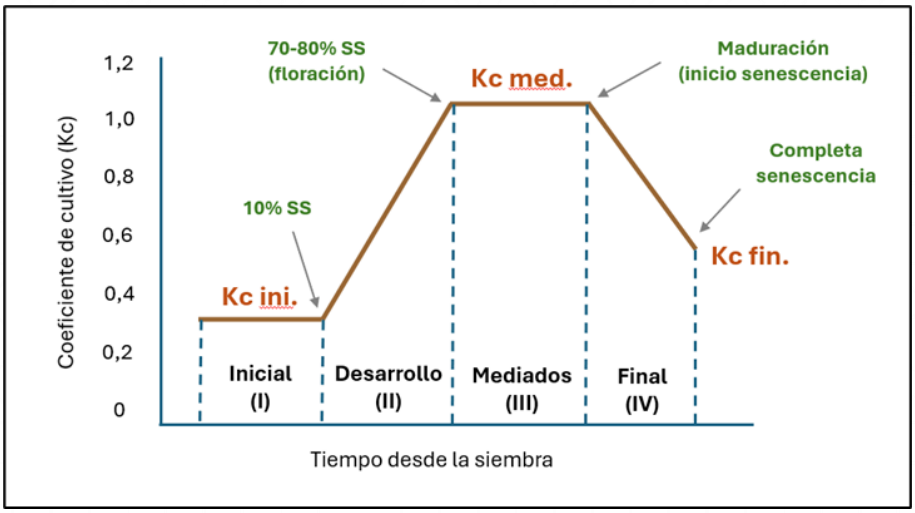


Figura 2. Evolución del coeficiente de cultivo (K_c) en el ciclo de crecimiento de un cultivo. Se diferencian las cuatro etapas: inicial, desarrollo, mediados y final. SS: Superficie sombreada del cultivo sobre el suelo. Elaboración propia a partir de Allen *et al.* (2006)

Este coeficiente de cultivo único recoge conjuntamente la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de la planta. Otra forma de explicar el coeficiente de cultivo es entenderlo dividido en dos procesos independientes, es decir, considerar que se divide en una parte que explica la transpiración de la planta y en otra que asume la evaporación desde el suelo, es lo que se denomina coeficiente de cultivo dual. Está compuesto por la suma de un coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) y un coeficiente de evaporación desde el suelo (K_e). Los valores del coeficiente de cultivo basal para las diferentes especies cultivadas y el coeficiente de evaporación del suelo se pueden encontrar en Allen *et al.* (2006).

En la Tabla 1 se recogen los valores más usuales de duración de las fases y de los coeficientes de cultivo únicos, para algunas especies hortícolas frecuentes cultivadas en el Valle del Guadalquivir (Fereres *et al.,* 1998). Más información sobre K_c y las duraciones de las distintas fases en estas y otras especies hortícolas se pueden consultar en el Manual de Riego y Drenaje nº 56 de la FAO (Allen *et al.* 2006). Algunos valores de K_c pueden variar en función de determinadas prácticas culturales; por ejemplo, en casos como el cultivo de tomate o pimiento sobre tutores de 1,5 - 2 m de alto, los K_c de la fase de mediados deberían incrementarse un 5-15%.

La duración de cada uno de los periodos puede variar para una misma especie en función del clima, la latitud, la altitud, la fecha de siembra y la variedad cultivada, por lo que siempre habrán de tomarse los valores tabulados como una orientación en ausencia de fuentes más precisas. Otros trabajos han relacionado los coeficientes de cultivo con los índices de vegetación,

metodología basada en teledetección y que deriva el valor del coeficiente de cultivo desde las imágenes multiespectrales adquiridas por sensores a bordo de plataformas espaciales, aerotransportadas o en tierra. Existen trabajos realizados en herbáceos, leñosos y hortícolas como por ejemplo el ajo (González-Dugo *et al*., 2009; Mateos *et al*., 2013).

Tabla 1. Duración de las fases de crecimiento y valores de coeficientes de cultivo de algunas hortícolas frecuentemente cultivadas en el Valle del Guadalquivir al aire libre

	Duración de las fases					Coeficiente de cultivo			
Cultivo	**Inicial (I)**	**Desarrollo (II)**	**Cobertura total (III)**	**Maduración (IV)**	**Total**	$K_{c\ ini}$	$K_{c\ med}$	$K_{c\ fin}$	**Fecha de siembra**
Ajo	30	60	90	30	210	0,3	1,1	0,75	1/11
Cebolla	40	45	50	45	180	0,35	1,1	0,8	1/3
Tomate	55	50	51	34	190	0,3	1,15	0,70	26/2
	43	40	39	37	159				2/4
	25	40	36	41	142				30/3
	15	40	31	29	115				3/6
Melón	40	34	33	28	135	0,25	1,10	0,25	15/2
	31	36	36	34	137				16/3
	24	30	40	27	121				16/4
Patata	20	30	55	30	135	0,5	1,15	0,65	1/8
	25	40	55	25	145	0,55	1,15	0,50	1/3

3. Programación del rigo

3.1. Programación del riego basada en el balance de agua en el suelo

La programación del riego es un método mediante el cual se determina cuándo regar y cuánta agua aplicar, o lo que es lo mismo, las fechas y las dosis de riego. Existen varios métodos para programar el riego. Uno de ellos se fundamenta en la estimación del estado hídrico de la planta a través de la medición de variables que están íntimamente relacionadas con el grado de hidratación, tales como el potencial hídrico de la hoja, la temperatura del dosel vegetal, el flujo de savia, entre otras. Otro método consiste en determinar el estado hídrico del suelo con sensores que miden la resistencia o la capacitancia de este. Todas ellas aproximan con bastante exactitud el momento apropiado del riego, pero no informan directamente sobre la dosis necesaria a aplicar. Además, necesitan de un alto componente tecnológico e instrumental. En los últimos años se está desarrollando un gran avance en la disponibilidad de equipos de bajo coste de estimación de la humedad del suelo, que avanzan al mismo tiempo que el desarrollo de protocolos de comunicación y transmisión de datos. Se trata de tecnologías tipo IoT como LoRaWAN o SigFox, que transmiten los datos en tiempo real del nodo a internet para su posterior análisis e interpretación y que permiten procesar y comunicar la información de los sensores integrados. Por otro lado, valores de aumento relativo de la eficiencia del riego y reducción del volumen aplicado para diferentes estrategias de programación de riegos se presentan en de Pascale *et al*. (2011).

En este capítulo se va a describir el método más robusto y ampliamente utilizado para la programación del riego, que no es otro que el del Balance de Agua en el suelo. Este método es el más extendido para la programación de riegos. Consiste en la contabilización de todas las

entradas (fundamentalmente riego y precipitación) y salidas de agua del sistema (ET_c, escorrentía, drenaje y variación de la humedad del suelo) (Ec.2 y Figura 3). Las Necesidades netas de agua de riego (N_n) de un cultivo (Villalobos *et al.,* 2017) dependerán del valor potencial de la ET_c, del agua procedente de la precipitación efectiva (Pe) y de la extraída del suelo durante un período de tiempo determinado (la extracción de agua del suelo se expresa como incremento en el contenido total de agua en el suelo con un signo negativo):

$$\text{Necesidades Netas de Riego } (N_n) = ET_c - P_e - (-\Delta W) = ET_c - P_e + \Delta W \text{ (Ec.2)}$$

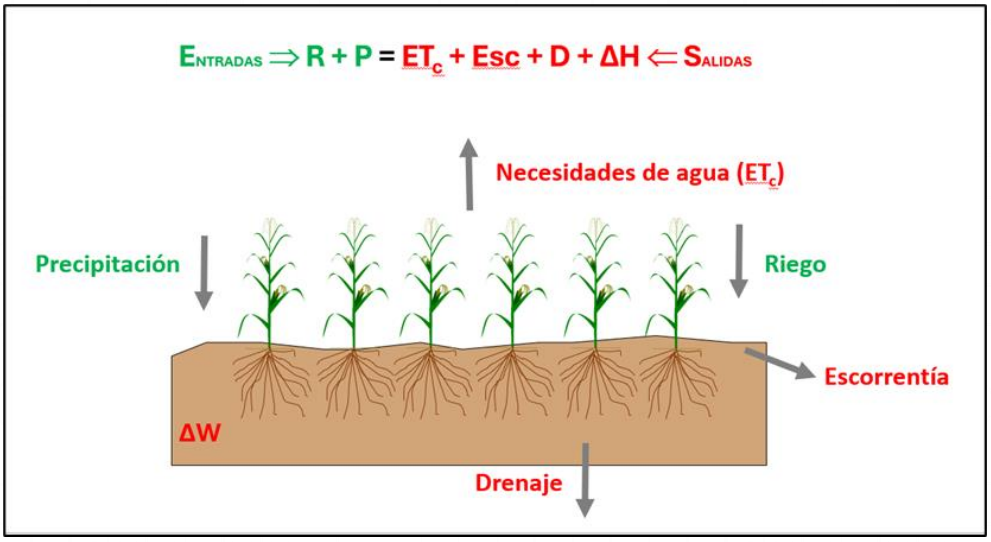


Figura 3. Método del Balance de Agua en el suelo para la Programación del riego

Es sabido que no toda el agua que se aporta al suelo con un riego es aprovechada por las raíces del cultivo, sino que parte de ella se pierde. La eficiencia de aplicación del riego (Ea), es precisamente el porcentaje de agua que las raíces aprovechan respecto del total aplicado. Su valor depende del método de riego, pero en sistemas de riego por goteo es deseable que no baje del 80%. Aplicando este coeficiente a las necesidades netas de riego, obtendremos las necesidades brutas o lámina aplicada de riego.

El criterio seguido para la programación es regar cuando se alcance un determinado déficit de agua en el perfil del suelo explorado por las raíces. El inicio de la programación es conveniente hacerla después de un episodio de lluvias o de un riego abundante para que el suelo esté a capacidad de campo. Teniendo en cuenta la ecuación 2, podemos establecer que el Déficit de agua en el suelo, considerado como el agua requerida para llevar el suelo a capacidad de campo (Figura 4), tiene matemáticamente la siguiente ecuación (Ec.3):

$$DAS_t = DAS_{t-1} + ET_c - P_e - R \text{ (Ec.3)}$$

Siendo DASt y DASt-1 los Déficits de Agua en el suelo en los momentos actual y precedente. En el epígrafe anterior se ha visto cómo se calcula la ET_c del cultivo. En cuanto a la precipitación efectiva (Pe), es aquella fracción de la lluvia total que es útil para la planta, es decir la resultante de descontar de ésta la escorrentía y la percolación profunda o drenaje. La escorrentía se puede estimar por el Método del Servicio de Conservación de Suelos de USDA ("Número de Curva") y la percolación profunda con modelos simples que estiman la tasa de percolación (SWCON), pero a pesar de la existencia de estos procedimientos, es difícil tener garantía total de acierto, debido a la gran variedad de factores que pueden influenciar la estimación de estos parámetros. Para

el cálculo de la Pe es usual emplear el método de Bureau of Reclamation de Estados Unidos (USDA) (Villalobos *et al.*, 2017) o aplicar un porcentaje reductor sobre el total de precipitación. Valores de 0,7-0,8 son frecuentemente utilizados para determinar la precipitación efectiva asumiendo pérdidas del 20-30% de la lluvia.

Posteriormente se han de establecer reglas de decisión para determinar la fecha y la dosis de riego y que dependerán de factores como el cultivo, el suelo, el clima y el sistema de riego. Existe un Déficit de agua en el suelo máximo tolerable (DAS_m), que no debe ser excedido, y que se considera el Agua Útil para el cultivo (AU), es decir, el volumen total de agua que puede extraer el cultivo sin que se produzca reducción en la tasa de transpiración (Ec. 4 y Figura 4).

$$DAS_m(AU) = IHD \times NAP \times Zr \text{ (Ec. 4)}$$

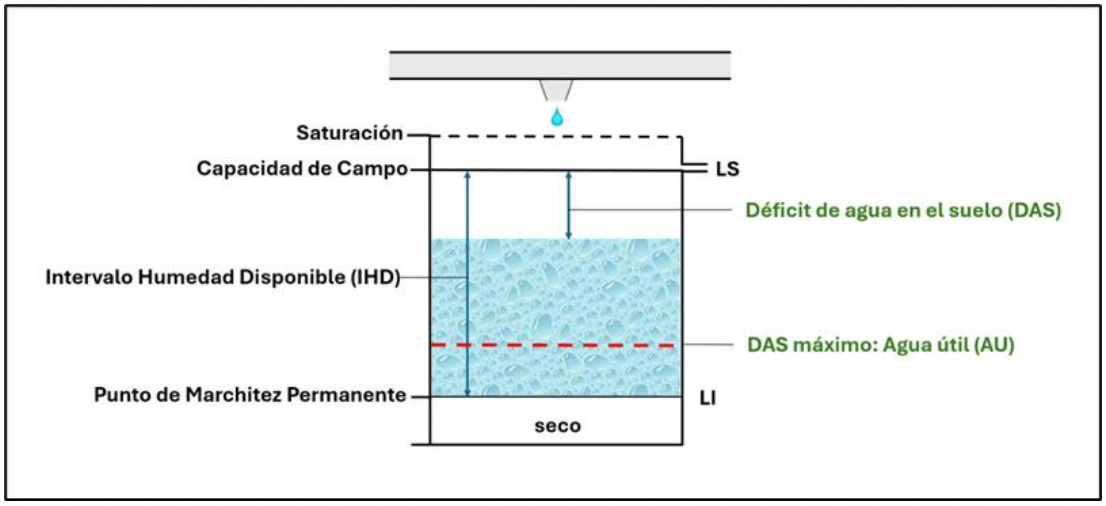


Figura 4. Variables explicativas del contenido de agua en un suelo: Saturación, Capacidad de Campo y Punto de Marchitez Permanente con indicación del Intervalo de Humedad Disponible. Se representa el Déficit de Agua en el suelo en un día determinado y el DAS máximo permitido para las condiciones del ejemplo.

El valor de DAS_m va a depender de tres factores fundamentales. Veamos con detalle cada uno de ellos. La diferencia entre los contenidos de humedad del suelo correspondientes a Capacidad de Campo y el Punto de Marchitez Permanente, corresponderá al contenido de agua disponible para las plantas que un suelo puede retener (Tabla 2). A esta diferencia se le denomina Intervalo de Humedad Disponible (IHD) (Figura 4). Los valores se expresan en mm de altura de agua por metro de profundidad de suelo. Existen valores tabulados en la bibliografía que recogen los valores de IHD para diferentes texturas del suelo (Allen *et al.*, 2006). Pueden considerarse valores de IHD orientativos en suelos arenosos, francos y arcillosos de 100, 150 y 200 mm/m, respectivamente.

El contenido de agua en el que, teóricamente, el nivel de estrés empieza a afectar a la producción del cultivo se denomina Nivel de Agotamiento Permisible (NAP) y se puede expresar como porcentaje sobre el IHD. Este nivel de agotamiento de agua en el suelo estará asociado al correspondiente potencial hídrico en el mismo. Existen valores de NAP disponibles en el documento "La Evapotranspiración de los cultivos en el Valle del Guadalquivir" del grupo de trabajo sobre necesidades hídricas (Tabla 3). A nivel práctico se puede considerar que el NAP es estable y oscila entre 0,7 y 0,8 para cultivos extensivos, disminuyendo a valores de 0,3-0,4 en el

caso de hortícolas extensivos con importancia en el tamaño del órgano cosechable (Villalobos *et al*., 2017). Nunca se debe considerar un NAP por debajo de 0,2.

Tabla 2. Valores medios de θ_{CC} y de θ_{PM} para distintos tipos de suelos (Clasificación USDA). Elaboración propia a partir de Allen *et al*. (2006)

	θ_{CC}	θ_{PM}
Textura	**m^3/m^3**	**m^3/m^3**
Arenosa	0,07-0,17	0,02-0,07
Arenoso-Franca	0,11-0,19	0,03-0,10
Franco-Arenosa	0,18-0,28	0,06-0,16
Franca	0,20-0,30	0,07-0,17
Franco-Limosa	0,22-0,36	0,09-0,21
Limosa	0,28-0,36	0,12-0,22
Franco-Limo-Arcillosa	0,30-0,37	0,17-0,24
Arcillo-Limosa	0,30-0,42	0,17-0,29
Arcilloso	0,32-0,40	0,20-0,24

Tabla 3. Niveles de Agotamiento Permisible (fases inicial, media y final del ciclo) y valores de Fad para algunos hortícolas al aire libre. Elaboración propia de Villalobos *et al*., (2017) y del documento "La Evapotranspiración de los cultivos en el Valle del Guadalquivir"

	NAP			F_{ad}
Cultivo	**Inicial**	**Media**	**Final**	
Patata	0,25	0,25	0,25	0,13
Tomate	0,3	0,4	0,6	0,12
Cebolla	0,3	0,3	0,6	0,14
Ajos	0,45	0,45	0,45	-
Lechuga	-	-	-	0,14

Cuando se trata de cultivos hortícolas hay que tener en cuenta el tamaño del órgano a comercializar, ya sea la raíz, el bulbo o las hojas. En este caso no debe existir déficit de agua, por lo hay que considerar la demanda evaporativa máxima del ciclo de la siguiente forma (Villalobos *et al*., 2017):

$$NAP = 1 - ET_{0\,max} \times F_{ad} \text{ (Ec. 5)}$$

Siendo Fad un coeficiente que indica la sensibilidad al déficit hídrico (Tabla 3).

Por último, para calcular el DAS_m, tenemos que conocer la profundidad radicular efectiva del cultivo, entendiéndose como aquella hasta la cual la planta puede extraer agua en una cuantía significativa. Valores de profundidad efectiva máxima se pueden encontrar en Allen *et al.* (2006) (Tabla 4).

Tabla 4. Profundidad radicular máxima efectiva (m) para diversos hortícolas

Cultivo	Zr máx	Cultivo	Zr máx
Patata	0,4-0,6	Melón	0,9-1,5
Tomate	0,7-1,5	Lechuga	0,3-0,5
Cebolla	0,3-0,6	Espárrago	1,2-1,8
Ajos	0,3-0,5	Brócoli	0,4-0,6
Zanahoria	0,5-1,0	Coliflor	0,4-0,7
Pepino	0,7-1,2	Calabacín	0,6-1,0
Sandía	0,8-1,5	Espinaca	0,3-0,5
Calabaza	1,0-1,5	Apio	0,3-0,5

En los periodos de establecimiento del cultivo, la raíz irá creciendo, por lo que la variable Zr irá variando con el tiempo y de la misma forma lo hará el AU. La ecuación de crecimiento de la raíz es la siguiente:

$$Z_r = Z_{r\,min} + (Z_{r\,max} - Z_{r\,min}) \times R_f \text{ (Ec. 6)}$$

Siendo $Z_{r\,min}$ la profundidad radicular mínima en el momento de la siembra (se puede usar un valor de referencia de 5 cm de profundidad de siembra), $Z_{r\,máx}$ la profundidad radicular máxima, que suele coincidir con cobertura completa del suelo (entorno al momento de la floración) y que dependerá de la profundidad del suelo y, por último, R_f que es la tasa de crecimiento de la raíz. Este último factor es la relación que existe entre los días después de siembra en el momento del cálculo y los días después de siembra necesarios para alcanzar la profundidad máxima (suma de los días de las fases I y II). Un ejemplo de determinación de la profundidad radicular se desarrolla en el apartado 3.3. de este capítulo.

La resistencia mecánica del suelo aumenta exponencialmente a medida que el suelo se seca y el crecimiento de la raíz se produce muy lentamente o no se produce en absoluto en un suelo seco. Por esta razón es aconsejable comenzar la campaña con un perfil de suelo completamente cargado (déficit de agua cero en la zona radical).

Con los tres parámetros descritos, podremos calcular el AU que tiene a su disposición el cultivo y tomar decisiones sobre el momento del riego y de la cantidad de agua a aplicar.

3.2. Estrategias de riego

Las estrategias de riego se pueden entender como criterios para decidir el momento de efectuar un riego y la cantidad de agua a aplicar.

1. Estrategia que se basa en aplicar el riego cuando el Déficit de Agua en el Suelo (DAS) sea igual al AU, aplicando el valor del déficit en la fecha del riego. Es la estrategia más recomendable teniendo en cuenta el balance de agua, ya que permite que no haya problemas de extracción de agua y que la producción final no se vea afectada, aplicando el menor número posible de riegos.

2. Si el valor comercial del cultivo es muy alto, es conveniente asegurarse de que las raíces de las plantas no tengan problema en extraer el agua en ningún momento, aplicando el riego antes de que el déficit alcance al AU. De esta manera se aumenta el número de riegos y, dependiendo del método de riego empleado, su coste. Además, esta estrategia puede ser necesaria por limitaciones del sistema de riego, por ejemplo, en riego por aspersión con sistemas estacionarios fijos sin cobertura total, como consecuencia de que el tiempo necesario para ejecutar todas las posturas sea tal que obligue a adelantar el inicio del riego.
3. En el caso de un turno fijo de suministro, para cualquier fecha en la que disponemos de agua, debemos regar si esperamos que el déficit exceda al nivel crítico antes de la próxima fecha en la que se dispondría de agua.

Hemos comentado que la dosis de riego a aplicar debe ser igual al déficit en la fecha de riego. Sin embargo, esta dosis podría ser mayor cuando se requiere el lavado de sales, o menor, dejando que la precipitación que pueda producirse se almacene en el suelo.

Es importante que al final de la campaña el agua del suelo esté agotada al 80-90% (Villalobos *et al*., 2017). De esta manera podrá utilizarse ese reservorio para el cultivo y será descontado de la dosis de riego a aplicar en el período final del ciclo. En la ecuación 7 se indica el riego final de ciclo:

$$R = DAS\ t,l - DAS\ t,h + \sum_{t=1}^{t=h}(ET - Pe) \text{ (Ec.7)}$$

Donde: DASt,l es el déficit de agua en el suelo en la fecha del último riego; DASt,h es el déficit de agua en el suelo en el momento de la cosecha y; por último se considera el valor acumulado de la diferencia "ET – Pe" esperable entre el último riego y recolección.

3.3. Ejercicio de programación del riego en un cultivo de patata

A continuación, se presenta una programación de riegos en tiempo real para un cultivo de patata, ubicado en la provincia de Sevilla. La duración del ciclo es de 145 días. La programación se realizará para el periodo comprendido entre el 15 de marzo (plantación) y el 19 de abril (35 días). La estrategia de la programación será regar cuando el déficit de agua en el suelo (DAS) sea aproximadamente igual al valor del Agua Útil (AU).

Los datos del ejemplo son los siguientes:

Suelo:

- Textura: Arcillo-limosa (sin restricciones en profundidad).
- Humedad volumétrica a Capacidad de Campo: θ_{CC} = 0,35
- Humedad volumétrica en el Punto de Marchitez: θ_{PM} = 0,20
- Intervalo Humedad Disponible: IHD= 0,15 (150 mm/m)
- Contenido inicial de humedad del suelo: θ_i = 0,305

Cultivo:

- Fecha de siembra: 15 de marzo.
- Profundidad radicular: $Z_{r\ min}$ = 5 cm (siembra) y $Z_{r\ max}$ = 60 cm

Los coeficientes de cultivo y la duración de las distintas fases de este ejemplo se especifican en la Tabla 5. No se ha considerado en este ejercicio el factor de sensibilidad para el cálculo del NAP y se fija un valor de Nivel de Agotamiento Permisible de 0,3 para este ejercicio.

Tabla 5. Valores de duración de las fases y Coeficientes de cultivo del ejemplo de Programación del riego en un cultivo de patata

Fase de cultivo	**I**	**II**	**III**	**IV**
Duración	25	40	55	25
Coeficiente de cultivo	**$K_{c\ ini}$**	-	**$K_{c\ med}$**	**$K_{c\ fin}$**
	0,55	-	1,15	0,50

Sistema de riego:

- Tipo y caudal: Aspersión a presión media y 1.500 l/h
- Marco aspersión: 12 m x 15 m
- Lámina de riego neta: 8,3 mm/h
- Eficiencia de aplicación del agua: 75%

A continuación, se presentan los resultados del balance diario y la programación del riego de los primeros 35 días y que aparecen recogidos en la Tabla 6.

Tabla 6. Programación del riego en un cultivo de patata en los primeros 35 días de crecimiento. Se indican los Días después de siembra (DDS), la Evapotranspiración de referencia, el Coeficiente de cultivo, la Evapotranspiración del cultivo, la Precipitación efectiva, la Profundidad radicular, el Agua Útil, el Déficit de agua en el suelo, el Riego bruto y el tiempo de riego diarios

Día	**DDS**	**ET_0 (mm)**	**K_c (1)**	**ET_c (mm)**	**Pe (*) (mm)**	**Zr (m) (2)**	**AU (mm) (3)**	**DAS (mm) (4)**	**Riego Bruto (mm) (5)**	**Tiempo (min)**
15/3	0	4,4	0,55	2,4	4,3	0,05	2,3	0,4	0,0	0
16/3	1	3,6	0,55	2,0	2,6	0,06	2,6	-0,1	0,0	0
17/3	2	4,3	0,55	2,4	1,7	0,07	3,0	0,5	0,0	0
18/3	3	4,2	0,55	2,3	0,0	0,08	3,4	2,8	0,0	0
19/3	4	3,5	0,55	1,9	0,0	0,08	3,8	4,8	0,0	0
20/3	5	3,7	0,55	2,0	1,0	0,09	4,2	0,2	5,5	40
21/3	6	3,4	0,55	1,9	0,0	0,10	4,5	2,1	0,0	0
22/3	7	3,6	0,55	2,0	0,0	0,11	4,9	4,1	0,0	0
23/3	8	3,5	0,55	1,9	0,0	0,12	5,3	6,0	0,0	0
24/3	9	3,3	0,55	1,8	0,0	0,13	5,7	0,2	7,6	54
25/3	10	3,3	0,55	1,8	0,0	0,13	6,1	2,1	0,0	0
26/3	11	3,4	0,55	1,9	0,0	0,14	6,4	3,9	0,0	0
27/3	12	4,5	0,55	2,5	0,0	0,15	6,8	6,4	0,0	0
28/3	13	4,7	0,55	2,6	0,0	0,16	7,2	9,0	0,0	0

29/3	14	4,7	0,55	2,6	0,0	0,17	7,6	1,5	10,1	73
30/3	15	4,2	0,55	2,3	0,0	0,18	8,0	3,8	0,0	0
31/3	16	6,3	0,55	3,5	0,0	0,19	8,3	7,2	0,0	0
01/4	17	4,1	0,55	2,3	0,0	0,19	8,7	9,5	0,0	0
02/4	18	3,4	0,55	1,9	0,0	0,20	9,1	-0,8	12,1	87
03/4	19	3,6	0,55	2,0	0,0	0,21	9,5	1,2	0,0	0
04/4	20	4,1	0,55	2,3	0,0	0,22	9,9	3,5	0,0	0
05/4	21	3,6	0,55	2,0	0,0	0,23	10,2	5,4	0,0	0
06/4	22	4,2	0,55	2,3	0,0	0,24	10,6	7,8	0,0	0
07/4	23	3,8	0,55	2,1	0,0	0,24	11,0	9,8	0,0	0
08/4	24	4,2	0,55	2,3	0,0	0,25	11,4	12,2	0,0	0
09/4	25	3,4	0,57	1,9	0,0	0,26	11,8	-1,6	15,7	113
10/4	26	3,9	0,58	2,3	0,0	0,27	12,2	0,6	0,0	0
11/4	27	3,5	0,60	2,1	3,6	0,28	12,5	-0,8	0,0	0
12/4	28	4,1	0,61	2,5	0,0	0,29	12,9	1,7	0,0	0
13/4	29	4,3	0,63	2,7	0,0	0,30	13,3	4,3	0,0	0
14/4	30	3	0,64	1,9	0,0	0,30	13,7	6,3	0,0	0
15/4	31	2,8	0,66	1,8	26,9	0,31	14,1	-18,8	0,0	0
16/4	32	2,6	0,67	1,7	1,9	0,32	14,4	-18,9	0,0	0
17/4	33	3,4	0,69	2,3	0,0	0,33	14,8	-16,6	0,0	0
18/4	34	5	0,70	3,5	0,3	0,34	15,2	-13,4	0,0	0
19/4	35	4,3	0,72	3,1	0,0	0,35	15,6	-10,3	0,0	0

(*) 80% de la Precipitación

(1) Los valores de los coeficientes de cultivo son fijos en los primeros 25 días y posteriormente se obtienen interpolando, puesto que éstos van creciendo en la fase II de desarrollo. Para ello se puede calcular la recta que definen los valores extremos de K_c:

- Recta definida por los puntos (0, 0,55) y (40, 1,15) -> $K_c = 0{,}015 \cdot D + 0{,}55$
- siendo D, el valor ordinal del día.

(2) El valor de la profundidad radicular se calcula diariamente en función de la evolución seguida por el cultivo.

$$Z_r = Z_{r\,min} + (Z_{r\,max} - Z_{r\,min}) \times R_f$$

Para el caso del segundo día de cultivo se obtendrá el siguiente valor de profundidad radicular:

$$Z_{r2} = 0{,}05 + (0{,}6 - 0{,}05) \cdot 2/65 = 0{,}07\ \mathrm{m}$$

(3) El valor diario de AU se calcula con la expresión: $AU = IHD \cdot NAP \cdot Zr$

(4) Para calcular el valor inicial del Déficit de Agua en el Suelo en el momento de la plantación, se ha de tener en cuenta que la humedad volumétrica inicial (θ_i) es 0,305. Así DASi será igual a:

$$DAS_i = (\theta_{cc} - \theta_i) \cdot Z_{r1} = (0{,}35 - 0{,}305) \cdot 0{,}05 \cdot 1000 = 2{,}3 \text{ mm}$$

Una vez hallado el valor de DAS_i los siguientes valores se calcularán mediante la elaboración del balance diario del contenido de agua en el suelo y se emplea la ecuación:

$DAS_t = DAS_{t-1} + ET_c - Pe - R$, siendo R la lámina de riego aplicada expresada en mm

El valor del déficit al final del día 0 de plantación será: = 2,3 + 2,4 – 4,3 = 0,4 mm

Valores negativos de DAS significan que no hay déficit de agua y se dejan en negativo para completar el balance de cada día. En la Tabla 6 vemos cómo el DAS se mantiene por debajo del AU hasta el día 4, por lo que se decide regar el AU5 y con una dosis igual a la correspondiente al AU.

(5) Puesto que el equipo suministra una lámina de 8,3 mm/h y que AU5 tiene un valor de 4,2 mm, se aplicarían, por tanto, 40 minutos de riego, que es el tiempo correspondiente a un riego bruto de 5,5 mm (75% eficiencia).

Una posible estrategia sería regar ligeramente por debajo del AU y de esa forma no se llena el contenido de agua del suelo hasta el nivel máximo de capacidad de campo, con el objetivo de dejar cierto almacén para posibles precipitaciones que puedan producirse.

El valor del DAS5 sería: DAS5 = DAS4 + ET_c5 – Pe5 – R5 = 4,8 + 2,0 – 1 – 5,5 = 0,25 mm

Si continuamos de la misma forma en el resto del periodo considerado, además del riego del día 5 después de la plantación, sería necesario aplicar riego al cultivo de patata los días 9, 14, 18 y 25 del periodo considerado.

4. Lavado de sales y uso de aguas salinas

La salinidad se convierte en un gran problema en la agricultura de regiones áridas o semiáridas a consecuencia de las altas tasas de evapotranspiración y la escasez de agua para el lavado de las sales. Un aumento de la concentración de sales en el suelo puede provocar disminución del crecimiento de un cultivo según sea la sensibilidad de la especie a este estrés. Las sales que mayor daño ocasionarán a la planta son las que se encuentran en la zona de absorción activa de agua por las raíces. Para alejar estas sales necesitaremos aplicar una fracción de lavado (FL) al suelo de manera que supere a la necesaria para la evapotranspiración, lo que se llamará Necesidades de lavado (NL). La frecuencia y la cantidad de lavado depende de la calidad del agua, del clima, del suelo y de la sensibilidad del cultivo a la salinidad.

Como consecuencia del consumo de energía relativamente bajo, la inundación es el método tradicionalmente empleado para el lavado de sales, aunque no necesariamente es el más eficiente (Losada, 1997). Para un manejo eficiente de las dosis de lavado, éste debe efectuarse en las etapas más sensibles del cultivo. En cuanto a la calidad del agua aplicada en la fracción de lavado, hay que considerar que su conductividad eléctrica debe ser más baja que la de la solución

del suelo, ya que cuanto menor sea el contenido de sales del agua de lavado, más efectivo será éste.

El control de la salinidad que lleva a cabo el lavado se realiza con mayor facilidad en suelos arenosos, donde la evacuación de las sales puede tener lugar incluso con lluvias relativamente escasas. A medida que la textura del suelo es más fina, las dificultades para prevenir la acumulación de sales en el suelo van aumentando, especialmente si el drenaje es insuficiente.

Dependiendo del grado de lavado y de drenaje, la distribución de sales en el perfil del suelo puede ser uniforme o ser muy irregular. Se puede producir el caso de que el excesivo lavado de sales provoque un aumento en la concentración de éstas en el agua de drenaje. La reutilización de estas aguas sin un manejo adecuado puede afectar a otras zonas que se encuentren aguas abajo. Por ello, la intercepción de las aguas de drenaje es una buena práctica para evitar estos problemas: en la medida que el agua de drenaje todavía sea utilizable para la transpiración por un cultivo de mayor tolerancia a las sales, debe ser interceptada, aislada y reutilizada para el riego (Rhoades, 1989).

Se han propuesto diversas estrategias para el uso de aguas salinas (o reutilización de aguas de drenaje salinas). Una es el uso del agua directamente para el riego. Otra forma es alternar aplicaciones de agua salina con aguas de mejor calidad (donde exista esta disponibilidad). Una tercera forma es mezclar el agua de buena calidad con el agua salina. Trabajos con aguas desalinizadas, subterráneas salobres y mezclas de ellas, se han efectuado en el sudeste de Andalucía para determinar su repercusión en la producción y calidad de los cultivos de melón, tomate y pimiento (Alonso *et al.,* 2020). Obviamente, la estrategia óptima depende del nivel de salinidad del agua salina, la calidad del agua no salina, la tolerancia del cultivo, el tipo de suelo, etc. Aunque no se puede esperar una regla universal para todos los casos, en opinión de algunos autores (Hillel, 1994) es preferible la estrategia cíclica a la de mezcla porque permite al suelo 'renovarse' cada cierto tiempo.

El nivel de sensibilidad de la especie en un escenario de salinidad del suelo se puede medir como rendimiento relativo (RR), es decir, como porcentaje del rendimiento máximo, y se calcula con la siguiente ecuación:

$$RR = 100 - B_s \cdot (CE_e - CE_{eu}) \text{ (Ec.8)}$$

Siendo CE_{eu} el valor umbral de salinidad por encima del cual hay caída de rendimiento y Bs el porcentaje de caída de rendimiento que ocurre para un incremento de la CE del extracto saturado del suelo (CE_e). Un resumen de estos parámetros para las principales especies hortícolas se puede encontrar en Villalobos *et al.* (2009).

Las NL que se deben aplicar a un cultivo van a depender de la propia especie vegetal y de la conductividad que tenga el agua de riego. Para calcular las NL se utilizan dos ecuaciones según los riegos sean de alta o de baja frecuencia. Estas ecuaciones son:

$$NL\ (baja\ frecuencia) = 0{,}3086/F_s^{1{,}702} \text{ (Ec.9)}$$

$$NL\ (alta\ frecuencia) = 0{,}1794/F_s^{3{,}0417} \text{ (Ec.10)}$$

Siendo Fs el Factor de Concentración que es el cociente entre la CE_e admitida y la CE del agua de riego, o lo que es lo mismo, la inversa de la FL:

$$Fs = 1/FL = CE_e/CE_r \text{ (Ec.11)}$$

Veamos el mismo ejemplo anterior de la patata y vamos a calcular las necesidades de lavado para una conductividad del agua de riego de 3 dS/m y asumiendo que admitimos una reducción del 20% del rendimiento:

Con estas premisas y los valores de Bs y CE_{eu} para la patata (Villalobos *et al.* (2001) admitimos que la CE que cumple la ecuación 8 sería:

$$80 = 100 - 12 \cdot (CE_e - 1{,}7);\ CE_e = 3{,}3$$

La CE_e admitida es 3,3, por lo que calculamos el Fs de Concentración según la ecuación 11:

$$Fs = 3{,}3 / 3{,}0 = 1{,}1$$

Finalmente, las necesidades de lavado serían:

$$NL\ (baja\ frecuencia) = 0{,}3086 / 1{,}1^{\ 1{,}702} = 0{,}25\ (25\%)$$

$$NL\ (alta\ frecuencia) = 0{,}1794 / 1{,}1^{\ 3{,}0417} = 0{,}12\ (12\%)$$

5. Avances sobre la programación del riego

En los últimos años se está introduciendo una programación del riego automatizada con el objetivo de aplicar riegos muy eficientes, de manera fiable y con una baja dedicación por parte del regante. Este avance supone una adecuación de las dosis de riego y que se realiza de manera automática gracias a sensores de humedad del suelo. Estos sensores llevan consignas de activación del riego que previamente han sido calculadas con experimentación basada en Balance de agua del suelo. Muchos son los trabajos que emplean sensores de humedad del suelo como apuesta por esta tecnología que se encuentra ya lo suficientemente desarrollada para apoyar un óptimo manejo del riego con un coste asumible por el agricultor (Contreras *et al.,* 2016; Casadesús *et al.,* 2017; Vera *et al*., 2019; Millán *et al.,* 2020; Conesa *et al*., 2020).

Por otro lado, existen Plataformas y Apps de riego, desarrolladas por administraciones públicas, centros de investigación y empresas, que promueven una gestión sostenible del agua al analizar e integrar multitud de datos. Entre ellas podemos citar la Plataforma Tierra de la Fundación Cajamar (www.plataformatierra.es), el software de hortícolas en invernadero PrHo de la misma Fundación (Fernández *et al.,* 2008), el Recomendador de Olivar de IFAPA (www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa), la aplicación web SIAR-PR y MOPECO de la Universidad de Castilla La Mancha, InfoRiego en la Junta de Castilla y León, la App SIAR del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (www.siar.es), la App Riego Berry para la programación del riego de los frutos rojos (Gavilán *et al.,* 2021) y, para cultivos leñosos, la App de Riego Almendro (Lorite *et al.,* 2023).

Bibliografía

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Rome, Italia. FAO.

Alonso, F., Contreras, J.I, López, J.G., Cánovas, G., Baeza, R. 2020. Riego de cultivos hortícolas intensivos con mezclas de agua salobre y desalada. Pimiento. https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa. Pp: 19.

CAGPDS (2020). Superficies y Producciones Agrícolas. Manual de Estadísticas Agrarias y Pesqueras. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía.

Cai, J.; Liu, Y.; Lei, T.; Pereira, L.S. (2007). Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology, 145: 22–35.

Casadesús, J., Domínguez, J., Oliver, J. 2017. IRRIX, una Plataforma Web para la supervision y control automatizados del riego. XXXIV Congreso Nacional de Riegos. Tarragona. DOI: http//dx.doi.org/10.25028/CNRiegos.2017.A17.

Conesa, M.R., Conejero, W., Vera, J., Ruiz-Sánchez, M.C. 2020. Efecto del manejo del riego sobre la producción y calidad postcosecha de nectarina. XXVIII Congreso Nacional de Riegos. Parte I. Cartagena (Murcia). DOI:10.31428/10317/8668.

Contreras, J.I., Alonso, F., Cánovas, G., Baeza, R. 2016. Irrigation management of greenhouse zucchini with different soil matric potential level. Agronomic and environmental effects. Agricultural Water Management 183(9-10). DOI:10.1016/j.agwat.2016.09.025

De Pascale, S.; Dalla Costa, L.; Vallone, S.; Barbieri, G.; Maggio, A. (2011). Increasing Water Use Efficiency in Vegetable Crop Production: From Plant to Irrigation Systems Efficiency. Horttechnology, 21: 301–308.

Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. (1977). Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 24. FAO. Rome, Italy.

Fernández M.D., Céspedes A., González A.M. 2008. PrHo V. 2.0: Programa de Riego para cultivos Hortícolas en invernadero. Documento Técnico. Ed. Fundación Cajamar, Almería, España, 78 pp.

Flores, C., González, R., Camacho, E., Montesinos, P. 2022. An ICT-based decision support system for precision irrigation management in outdoor orange and greenhouse tomato crops. Agricultural Water Management 269 (2022) 107686. DOI: 10.1016/j.agwat.2022.107686.

Fereres et al. (1998). La evapotranspiración de los cultivos en el Valle del Guadalquivir. En: Las necesidades hídricas de los cultivos de cara al Plan Nacional de Regadíos: Metodología y su aplicación en los Valles del Guadalquivir y del Ebro.

Gallardo, M., Fernández, M.D., Giménez, C., Padilla, F.M., Thompson, R.B. 2016. Revised VegSyst model to calculate dry matter production, critical N uptake and ETc of several vegetable species grown in Mediterranean greenhouses. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.03.014.

Gavilán, P.; Ruiz, N.; Lozano, D. (2021). Riego Berry. Una herramienta para la Programación del Riego de los Frutos Rojos. Guía de uso. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. CAGPDS. Junta de Andalucía.

Giménez, C., Thompson, R.B., Prieto, M.H., Suárez-Rey, E., Padilla, F.M., Gallardo, M. 2019. Adaptation of the VegSyst model to outdoor conditions for leafy vegetables and processing tomato. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.01.003.

Gonzalez-Dugo, MP; Neale, CMU; Mateos, L.; Kustas, WP.; Prueger, JH,; Anderso MC; Li F. 2009. A comparison of operational remote sensing-based models for estimating crop evapotranspiration. Agricultural and Forest Meteorology, 149: 1843-1853.

Hanson, B.R. (1996). Error in using historical reference crop evapotranspiration for irrigation scheduling. In: Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. November 1996. San Antonio, TX. Pp, 220-224.

Hillel, D. (1994). Rivers of Eden: the struggle for water and the quest for peace in the Middle East. Oxford, U.K., Oxford University Press.

Lorite, J.I., Cabezas, J.M., Lovera, M., Santos, C., Alza, J., Gavilán, P., Arquero, O. (2023). App Riego Almendro: Una herramienta para la programación del riego en almendro. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. CAGPDS. Junta de Andalucía.

Losada, A. 1997. Fundamentos de la hidrología y de la práctica de los riegos. ETSIA, Universidad Politécnica de Madrid.

Lozano, D.; Ruiz, N.; Baeza, R.; Contreras, J.I.; Gavilán, P. (2020). Effect of Pulse Drip Irrigation Duration on Water Distribution Uniformity. Water, 12(8): 2276.

Mateos, L., González-Dugo, M.P., Testi, L., Villalobos, F.J. 2013. Monitoring evapotranspiration of irrigated crops using crop coefficients derived from time series of satellite images. I. Method validation. Agricultural Water Management 125: 81– 91.

Millán, S., Campillo, C., Casadesús, J., Pérez-Rodríguez, J.M., Prieto, M.H. 2020. Automatic Irrigation Scheduling on a Hedgerow Olive Orchard Using an Algorithm of Water Balance Readjusted with Soil Moisture Sensors. Sensors 2020, 20, 2526; doi:10.3390/s20092526.

Rhoades, J.D. 1989. Intercepting, isolating and reusing drainage waters for irrigation to conserve water and protect water quality. Agric. Water Mgmt. 16:37-52.

Vera, J., Conejero, W., Conesa, M.R., Ruiz-Sánchez, M.C. 2019. Irrigation Factor Approach Based on Soil Water Content: A Nectarine Orchard Case Study. Water 2019, 11, 589; doi:10.3390/w11030589.

Villalobos, F., Mateos, L., Fereres, E., 2017. La programación del riego mediante el balance de agua. En Villalobos F.J,, Fereres E. Eds. Fitotecnia. Principios de agronomía para una agricultura sostenible. Mundi Prensa, pp: 303 315. ISBN 978 84 8476 524 0.

Villalobos, F., Mateos, L., Orgaz, F., Fereres, E. 2009. Fitotecnia. Bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi Prensa. Pp: 496. ISBN 978 84 283 3344 3

BLOQUE III. USO DE RECURSOS HÍDRICOS NO CONVENCIONALES PARA EL RIEGO

3.1. Regeneración de aguas y su reutilización para riego

José Francisco Maestre Valero, Victoriano Martínez Álvarez*, Alberto Imbernón Mulero

Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)

* Josef.maestre@upct.es

Índice

1. Los recursos hídricos no convencionales en la planificación hidrológica 248
2. Situación actual de la reutilización de aguas para riego 250
   2.1. En el mundo 251
   2.2. En Europa 252
   2.3. En España 252
3. Fundamentos tecnológicos de la depuración de agua..... 253
4. Riego agrícola con aguas regeneradas 254
   4.1. Regulación del uso de las aguas regeneradas para riego 254
   4.2. Instalaciones para la regeneración de agua..... 257
5. Características físico-químicas del agua regenerada 260
6. Consideraciones agronómicas del riego con agua regenerada..... 261
   6.1. Riesgo de sodificación del suelo..... 261
   6.2. Rendimiento de cultivos y salinidad..... 263
   6.3. Impacto de la salinidad en los requerimientos de riego 265
   6.4. Iones fitotóxicos en el agua regenerada 266
   6.5. Beneficios nutricionales del riego con agua regenerada 268

Resumen

La presión hídrica sobre los distintos sistemas hidrológicos está aumentando progresivamente hasta un punto en el que, en muchas regiones, las demandas totales de agua pueden incluso superar los recursos hídricos naturales disponibles. La reutilización de aguas residuales para el riego agrícola se ha convertido en una de las principales estrategias para mitigar la escasez de agua. Este capítulo permite, en primer lugar, conocer una revisión del estado actual de la reutilización de agua regenerada en el mundo, en Europa y en España. A continuación, se revisan los fundamentos tecnológicos de la depuración de aguas residuales y la regeneración de aguas depuradas. Adicionalmente, se presenta el marco regulatorio sobre uso de las aguas regeneradas para riego, y se analizan, especialmente desde un punto de vista agronómico, las singularidades del agua regenerada. Cuando el destino de las aguas regeneradas es el uso

agrícola, sus características físico-químicas hacen que el riego con agua regenerada pueda generar impactos negativos y positivos sobre un agro-sistema. Por lo tanto, su aplicación eficiente y sostenible requiere el conocimiento de ciertos aspectos agronómicos que se consideran claves. En este contexto, el capítulo presenta, en primer lugar, los principales riesgos del riego con agua regenerada sobre la sodificación del suelo, la acumulación de iones fitotóxicos en el dosel vegetal y las posibles pérdidas de rendimiento causadas por la salinidad de las aguas regeneradas. Finalmente, también se presentan los potenciales beneficios nutricionales del riego con agua regenerada.

El análisis aquí presentado evidencia el gran potencial de la reutilización de agua regenerada para el riego agrícola, el cual representa un soporte fundamental para la resiliencia del regadío y la seguridad alimentaria de regiones afectadas por déficit hídrico. Sin embargo, los resultados expuestos manifiestan la existencia de ciertos aspectos agronómicos que se deben tener en cuenta a la hora de regar con agua regenerada.

1. Los recursos hídricos no convencionales en la planificación hidrológica

La escasez de agua ya afecta a amplias regiones en todos los continentes (UNESCO, 2023). En las últimas décadas, la presión sobre los distintos sistemas hidrológicos ha aumentado progresivamente como consecuencia de: (1) el importante crecimiento de la población y el consecuente incremento en la demanda directa de agua; (2) la mayor necesidad de alimentos, que ha fomentado la continua expansión de regadío como principal medida para incrementar la productividad agrícola; y (3) una mayor preocupación por la conservación del medio ambiente, que ha incrementado la demanda de agua del medio natural y restringido la sobreexplotación de las aguas subterráneas. Estas presiones están dado lugar a un crecimiento progresivo de las demandas totales de agua, que pueden llegar a superar los recursos hídricos naturales disponibles en muchas regiones, generando un desequilibrio o déficit hídrico estructural en su planificación hidrológica. Este escenario de escasez hídrica se ve exacerbado por los efectos del cambio climático, que está produciendo una reducción progresiva de las precipitaciones y, consecuentemente, de los recursos hídricos naturales en muchas regiones (IPCC, 2022).

La consolidación de este déficit hídrico suele ser origen de conflictos entre los distintos usuarios de las demarcaciones o unidades de gestión afectadas, conflictos que pueden alcanzar la escala interregional o internacional. La agricultura de regadío, como sector que concentra la mayor parte de la demanda de agua (en torno al 70% de forma global, y por encima del 80% en muchas regiones áridas y semiáridas), puede verse gravemente afectada por estas situaciones, al tratarse de un uso de menor prioridad que el doméstico o urbano.

La mitigación del déficit hídrico mediante el reequilibrio de la planificación hídrica en las regiones con escasez de agua puede abordarse actuando sobre las demandas o sobre los recursos. Una actuación dirigida a reducir las demandas puede afectar gravemente a la seguridad alimentaria, dado que conllevará la disminución del regadío y, consecuentemente, de la producción de alimentos. Las actuaciones sobre los recursos no pueden orientarse a la detracción de mayores caudales del sistema hidrológico natural, ya que se encuentra en estado de déficit, por lo que sólo son factibles soluciones basadas en la aportación de recursos externos

a la región afectada (trasvases) o en la generación de nuevos recursos hídricos, al margen de los que convencionalmente nos proporciona la naturaleza a través del ciclo hidrológico. Estos nuevos recursos se denominan "no convencionales", y su generación y aplicación en la agricultura son el objeto de los dos próximos capítulos, ya que parecen fundamentales para conseguir la resiliencia de la agricultura de regadío ante la desfavorable situación de disponibilidad hídrica a la que se enfrentan muchas regiones (Qadir *et al*., 2007; Ward, 2022)

Por tanto, los recursos hídricos no convencionales ofrecen suministros complementarios que pueden utilizarse para aliviar parcialmente la escasez de agua en regiones donde los recursos convencionales ya se encuentran comprometidos. En general, se entiende por recursos hídricos no convencionales aquellos que no están disponibles de forma natural o espontánea en la naturaleza, requiriendo la intervención humana para su producción y adaptación a usos específicos. Una exhaustiva revisión de estos recursos (Karimidastenaei *et al.,* 2022) incluye la recarga artificial de acuíferos, el agua de drenaje agrícola, la lluvia generada artificialmente mediante agentes dispersantes en las nubes, el agua desalinizada o desalobrada, la recolección de agua condensada, la captación de agua de nieblas, la explotación de depósitos fósiles de agua, la regeneración y reutilización de aguas residuales urbanas, la recolección de agua de lluvia y el remolcado de icebergs. La mayor parte de estas técnicas se relaciona con la producción de pequeñas cantidades de agua para satisfacer necesidades reducidas y locales de agua. Entre ellos, los métodos que pueden ofrecer un suministro masivo a la agricultura de regadío son la regeneración y reutilización de aguas residuales urbanas, y la desalación y desalobración de aguas salinas o salobres, cuya aplicación al riego agrícola se analiza en este capítulo y el siguiente, respectivamente.

La reutilización de aguas residuales y la desalación de agua marina se han convertido en los principales recursos no convencionales para el riego agrícola. Se pueden destacar dos factores que diferencian conceptualmente el binomio depuración-reutilización de la desalación de agua: el ambiental y el administrativo. Desde la perspectiva ambiental, la desalación pretende aportar agua en zonas donde este recurso es escaso mediante procesos que conllevan importantes emisiones de CO_2, debido a su elevado consumo energético y a vertidos masivos de salmueras al mar, por lo que sus efectos medioambientales son generalmente negativos. Sin embargo, la depuración de aguas residuales tiene un valor medioambiental más relevante que la desalación, ya que representa el aprovechamiento de un recurso que ha sido utilizado al menos una vez. En otras palabras, la depuración encaja perfectamente en los principios básicos de la economía circular al buscar aprovechar el recurso tantas veces como sea posible. Además, resulta necesario destacar el trascendente papel de la agricultura de regadío en la reutilización de agua, hasta el punto de que es prácticamente el único uso de este recurso, ya que tiene poca aceptación social para otros fines. En este sentido, la planificación hidrológica suele clasificar el uso agrícola de las aguas regeneradas en directo e indirecto, refiriéndose al primero cuando la producción se agua se dirige directamente a las zonas agrícolas donde se va a aplicar, y el segundo cuando se vierte al sistema hidrológico y es aprovechada para uso agrícola aguas abajo del punto de vertido.

Desde el punto de vista legal o administrativo, la regeneración de aguas residuales es de obligado cumplimiento en el ámbito europeo, fruto de la aplicación de la Directiva Europea 91/271 de depuración de aguas residuales urbanas y la posterior Directiva Marco del Agua

2000/60. Dicha perspectiva estableció los plazos y condicionantes en los que debían estar operativas las instalaciones para la depuración de todas las aguas residuales urbanas, con independencia de su ulterior reutilización. Por el contrario, la implementación de la desalación de agua marina responde a una necesidad en aquellos lugares donde no existen otras alternativas para paliar la escasez de recursos hídricos, convirtiéndose en un proceso voluntario.

Un claro ejemplo de la incorporación de los recursos no convencionales en la planificación hídrica se encuentra en España, especialmente en las demarcaciones hidrográficas del sureste (Cuenca del Segura y Cuencas Mediterráneas Andaluzas). En estas demarcaciones, los recursos hídricos no convencionales han pasado de representar usos anecdóticos a constituir una parte relevante de los recursos disponibles. Por un lado, en ellas, se regenera cerca del 100% de las aguas residuales urbanas, reutilizándose posteriormente en la agricultura. Además, la importancia de las aguas desaladas para abastecimiento urbano y agrícola ha experimentado un crecimiento constante, representando un componente imprescindible en la planificación hidrológica actual. La Figura 1 muestra la relevancia de los recursos hídricos en la Cuenca del Segura y las Cuencas Mediterráneas Andaluzas, donde es de esperar que, ante el agravamiento de las situaciones de escasez, las actividades de desalación experimenten un desarrollo adicional en el futuro.

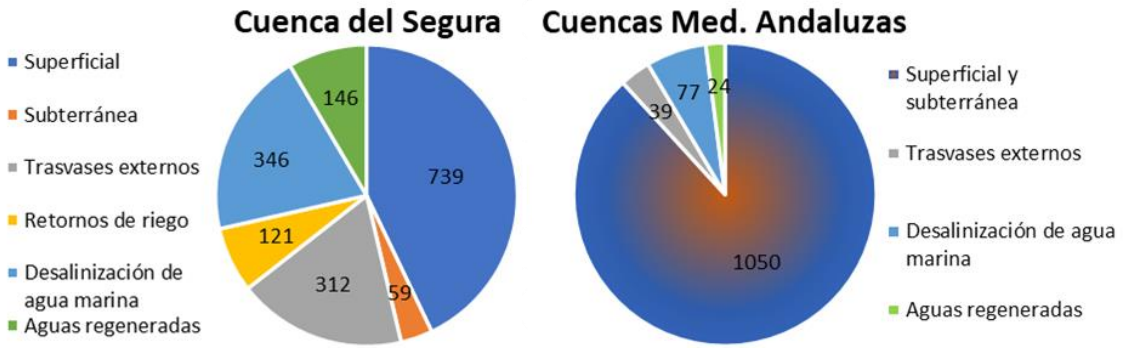


Figura 1. Recursos hídricos disponibles (hm^3) en las demarcaciones hidrográficas del Segura y Cuencas Mediterráneas Andaluzas en el ciclo de planificación 2022 – 2027

2. Situación actual de la reutilización de aguas para riego

El Real Decreto-ley 11/1995, de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las **aguas residuales urbanas**, define éstas como las aguas residuales domésticas o la mezcla de éstas con aguas residuales industriales o con aguas de escorrentía pluvial. Mateo-Sagasta (2015) añade que son aguas usadas que se han contaminado como resultado de actividades humanas. Así mismo, el Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las **aguas depuradas**, define las aguas depuradas como aguas residuales que han sido sometidas a un proceso de tratamiento que permita adecuar su calidad a la normativa de vertidos aplicable, y las **aguas regeneradas** como aguas residuales depuradas que, en su caso, han sido sometidas a un proceso de tratamiento adicional o complementario que permite adecuar su calidad al uso al que se destinan.

La reutilización del agua, que se remonta a 1912 mediante el riego de parques en California (Asano, 2001), es una práctica establecida en varios países y regiones del mundo principalmente afectadas por escasez hídrica (Lazarova, 2013). En Israel, por ejemplo, se reutiliza el agua para el riego agrícola desde los años 50, y actualmente cubre más del 50% de la demanda de agua agrícola (Tal, 2016). En las últimas dos décadas, el uso mundial de agua regenerada ha experimentado un desarrollo acelerado (Qadir *et al*., 2018; Jones *et al*., 2021). La reutilización del agua regenerada es una práctica que debe cumplir técnicamente con varios requisitos: (i) satisfacer la calidad de agua necesaria para el uso previsto, (ii) no deteriorar ni afectar los entornos a los que llega, (iii) no causar problemas de salud a los individuos en contacto con la actividad a la que se le destina, y (iv) cumplir con el concepto de sostenibilidad. A continuación, se expone brevemente la situación de la reutilización de agua regenerada en el mundo, en Europa y en España.

2.1. En el mundo

En la actualidad, alrededor del 47,7% de todas las aguas residuales del mundo son simplemente vertidas, donde pueden generar riesgos para la salud, el medio ambiente y el clima. A escala mundial, Jones *et al*. (2021) estimaron una producción anual de aguas residuales de 359,4 × 10^9 m^3/año. Determinaron que la recogida y el tratamiento anuales de aguas residuales ascendió a 225,6 × 10^9 m^3/año y 188,1 × 10^9 m^3/año, respectivamente. Estas cifras indican que, aproximadamente, el 63% y el 52% de las aguas residuales producidas en todo el mundo se recogen y tratan, respectivamente, y que cerca del 84% de las aguas residuales recogidas se someten a tratamiento. La reutilización de las aguas residuales se estimó en 40,7 × 10^9 m^3/año, lo que representa alrededor del 11% del volumen total de aguas residuales producidas o el 22% de las aguas residuales tratadas. Por lo tanto, estos datos indican que el 78% restante (agua tratada no reutilizada; 147,4 × 10^9 m^3/año) se vierte al medio ambiente. Esto contrasta con la estimación de 171,3 × 10^9 m^3/año de aguas residuales vertidas directamente al medio ambiente sin ningún tipo de tratamiento. La Figura 2 muestra los datos sobre aguas residuales a escala mundial en términos proporcionales (m^3/año per cápita para la producción; porcentaje de aguas residuales producidas para la recogida, el tratamiento y la reutilización), lo que permite realizar comparaciones directas entre países (Jones *et al*., 2021).

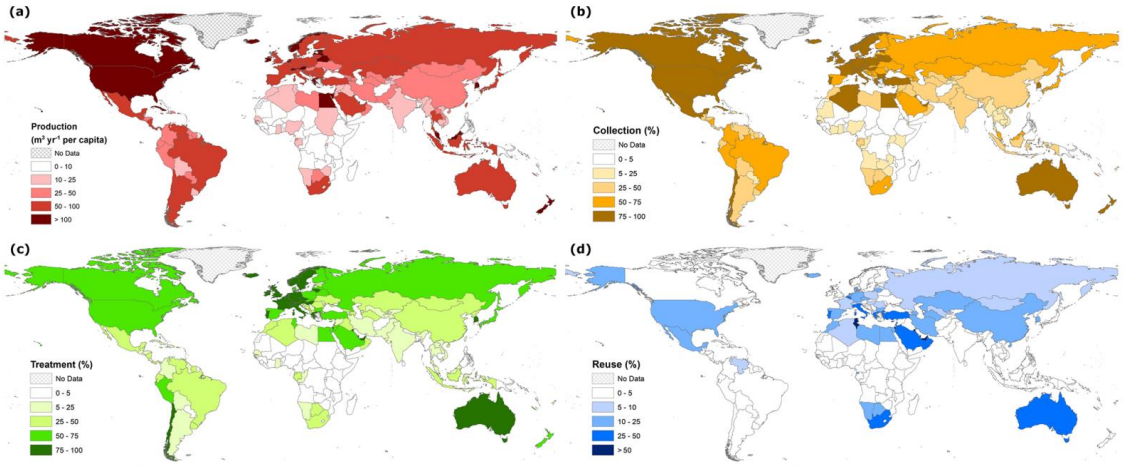


Figura 2. Producción de aguas residuales (m^3/año per cápita) (a), recogida (%) (b), tratamiento (%) (c) y reutilización (%) (d) a escala nacional. Fuente: Jones et al. (2021)

2.2. En Europa

A escala europea, los datos sobre la situación general de la reutilización del agua en los estados miembros son de limitada fiabilidad (BIO by Deloitte, 2015). En base a los datos de la encuesta EUREAU y resultados del proyecto AQUAREC 2006 (Urkiaga *et al*., 2006), la Figura 3 muestra la situación de la reutilización del agua en Europa (Hochstrat *et al.,* 2006). Estos datos indican que el volumen total de agua reutilizada asciende a 751 hm^3/año; cifra que representa aproximadamente el 2,4% de los efluentes de aguas residuales urbanas tratadas en la Unión Europea y menos del 0,5% de las extracciones anuales de agua dulce de la unión europea. Se debe resaltar que, en Europa, sólo Alemania, Chipre, España, Francia, Grecia, Italia, Malta, Portugal y Reino Unido reutilizan volúmenes de agua de cierta significancia, aunque con niveles bastante diversos; 0,08% Reino Unido frente al 97% de Chipre. Por lo tanto, el potencial de la Unión Europea es mucho más elevado, del orden de 6000 hm^3/año, cifra que es casi seis veces el volumen actual (Romero-Trigueros, 2017). Adicionalmente, existen en la actualidad varias iniciativas de reutilización en países del centro y del norte, como Bélgica, Suecia y Reino Unido (CE, 2016; EWA, 2017).

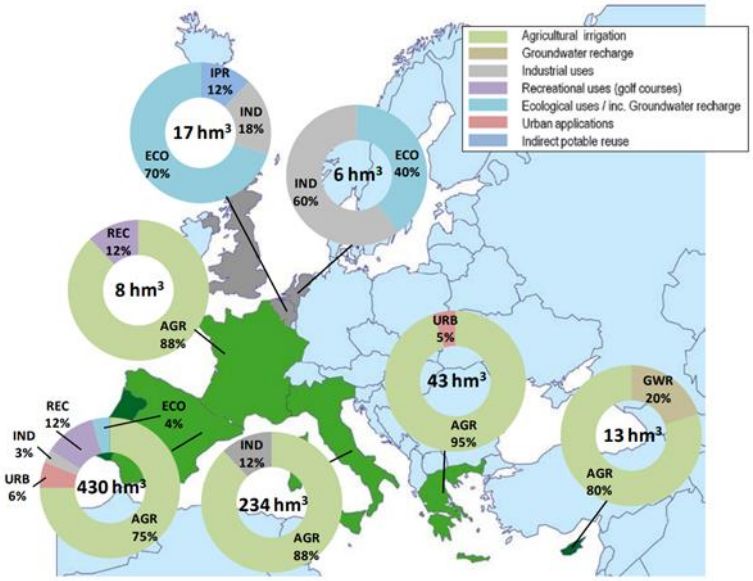


Figura 3. Situación de la reutilización de agua en Europa. Fuente: Hochstrat *et al*. (2006)

2.3. En España

La demanda actual de los recursos hídricos se distribuye en diferentes sectores (urbano, agrícola, industrial, uso recreacional, etc.), siendo la demanda agrícola la más importante con alrededor de 24.094 hm^3/año. En las regiones de España con una situación de déficit estructural de agua más acusada, como ocurre en la cuenca mediterránea, el uso agrícola de agua regenerada resulta de gran importancia, ya que permite una gestión más eficiente de los recursos hídricos. En España se trata anualmente un volumen de agua residual de 4726 hm^3. Sin embargo, según la CE (2016), el volumen de agua regenerada reutilizada en el año 2006 fue sólo de 438 hm^3/año, de los cuales, el 79,2% se destinaron a la agricultura. Datos más recientes del Instituto Nacional de Estadística (INE) indican que el volumen de agua reutilizada en 2020 aumentó a 532 hm^3/año, de los cuales el 72,4% (385,2 hm^3/año) se destinaron a la agricultura (INE, 2020) (Figura 4). Dentro del panorama nacional, Valencia (199 hm^3/año) y Murcia (105 hm^3/año) son las Comunidades Autónomas con mayores volúmenes reutilizados para el riego

agrícola. Estas dos Comunidades Autónomas suponen el 72% de las aguas reutilizadas para un fin agrario, o el 57,1% del total anual del caudal regenerado en España (Romero-Trigueros, 2017).

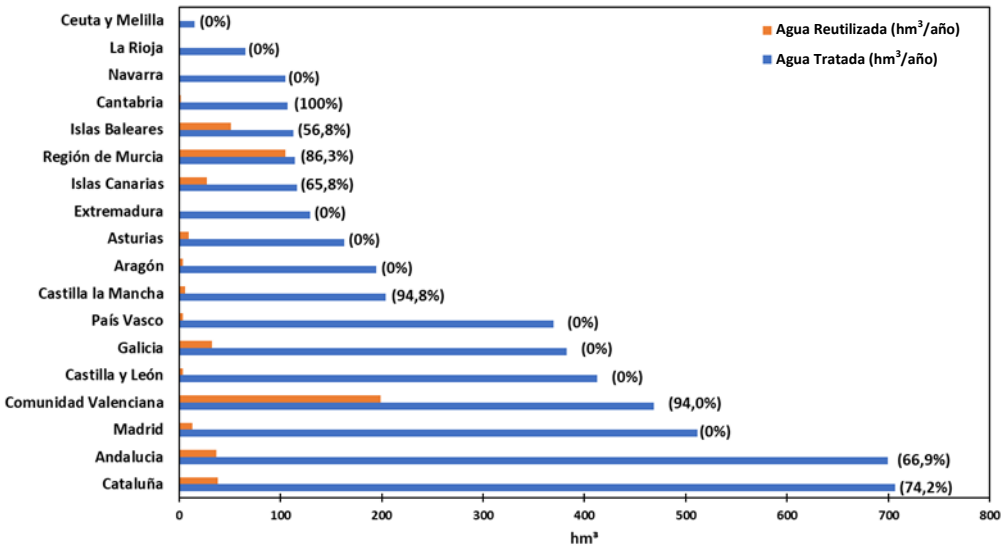


Figura 4. Situación de la reutilización de agua en España. Fuente: Elaboración propia a partir de INE (2020)

3. Fundamentos tecnológicos de la depuración de agua

Una estación depuradora de agua residual (EDAR) puede definirse como el conjunto de instalaciones que tiene por objeto la reducción de la contaminación de las aguas residuales hasta límites aceptables para el cauce receptor (Real Decreto-ley 11/1995). La Figura 5 muestra un esquema general del proceso de depuración de agua. De una forma muy resumida (MITECO, 2023), el agua residual entra a un pozo de gruesos situado a la entrada del colector de la depuradora con el fin de concentrar los sólidos y las arenas decantadas en una zona específica, desde la que se puedan extraer de forma eficaz, generalmente mediante una cuchara anfibia. Seguidamente, el desbaste permite la separación del agua residual de los sólidos tales como piedras, ramas, plásticos, trapos, etc., mediante rejas o tamices. El posterior desarenado tiene por objeto el eliminar las materias pesadas de granulometría superior a 200 micras, con el fin de evitar que se produzcan sedimentos en los canales y conducciones, para proteger las bombas y otros aparatos contra la abrasión, y para evitar sobrecargas en las fases de tratamiento siguientes. La operación de desengrasado permite eliminar las materias flotantes más ligeras, que, de no ser retiradas, podrían distorsionar los procesos de tratamiento posteriores; principalmente aquellos relacionados con la oxigenación en el tratamiento secundario reduciendo así su eficiencia. La decantación primaria tiene como objetivo la reducción de los sólidos en suspensión de las aguas residuales bajo la exclusiva acción de la gravedad. En aguas con elevada carga contaminante, el tratamiento primario puede complementarse con un tratamiento físico-químico denominado coagulación-floculación, que permite una mayor sedimentación de sólidos en el decantador. Se denomina coagulación al proceso de desestabilización de las partículas en suspensión coloidal presentes en el agua, mientras que la

floculación es la aglomeración de esas partículas desestabilizadas en flóculos más grandes que puedan decantarse en forma de lodo y posteriormente retirarse. Finalmente, el tratamiento secundario consiste en la eliminación de la contaminación del agua mediante una biocenosis desarrollada en un medio adecuado y con un ambiente controlado. Esta biocenosis se denomina coloquialmente reactor de fangos activados. Los tratamientos secundarios más rigurosos o avanzados son los que reducen, además de la materia carbonada, los nutrientes; principalmente el nitrógeno y el fósforo. Aunque existen varios mecanismos, la metodología más frecuente consiste en un cultivo en suspensión de microorganismos en el seno del agua que en condiciones aerobias degradan la materia orgánica del agua residual para posteriormente ser sedimentados en un tanque de decantación secundaria y retirados. El objetivo del tratamiento secundario es, por lo tanto, obtener un afino del efluente depurado, por exigencias del cauce receptor (RD 509/1996) y/o la mejora del efluente de cara a su paso por el tratamiento terciario para su posterior reutilización; regeneración de agua depurada. Cuando el destino del agua depurada es un uso concreto que requiere de unas características físico-químicas determinadas, el agua depurada debe someterse a un tratamiento de desinfección, denominado terciario, que la habilita para su reutilización. Detalles específicos sobre la regulación del uso de aguas regeneradas y los principales tratamientos implementados se describen en los apartados 4.1 y 4.2.

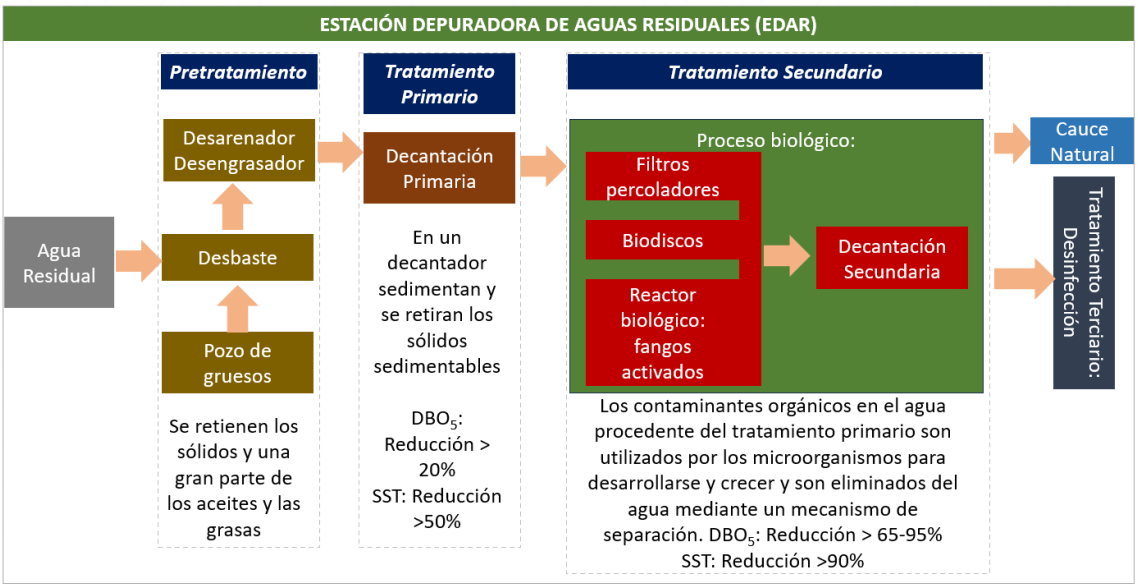


Figura 5. Esquema general del proceso de depuración de agua. Fuente: elaboración propia

4. Riego agrícola con aguas regeneradas

4.1. Regulación del uso de las aguas regeneradas para riego

La reutilización de las aguas residuales municipales, incluido el riego agrícola, es común principalmente en regiones y países como Oriente Medio, el norte de África, la región mediterránea, Australia, China, México y los Estados Unidos (UNESCO, 2017).

Tanto fuera como dentro de Europa, muchas organizaciones y países han promulgado leyes, reglamentos, directrices y normas para el riego con agua regenerada. La Tabla 1 muestra un resumen de las normativas publicadas en cada país, así como sus revisiones (Zhao *et al*., 2022).

Tabla 1. Resumen de las normativas publicadas en cada país, así como sus revisiones. Fuente: Adaptada de (Zhao *et al.,* 2022)

Norma	País	Descripción
		Fuera de Europa
WAI, 1992	Israel	Public Health Ordinance
MHR, 1996	Rusia	Hygienic Requirements to Wastewater and Sewage Sludge Use for Land Irrigation and Fertilization
AQSIQ, 2002a	China	GB/T 18919-2002. The Reuse of Urban Recycling Water-Classified Standard
AQSIQ, 2002b	China	GB/T 18920-2002. The Reuse of Urban Recycling Water-Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use
EPA, 2004	USA	Guidelines for Water Reuse
MLIT, 2005	Japón	Guidelines for the Reuse of Treated Wastewater
EPHCA, 2006	Australia	Australian Guidelines for Water Recycling: Managing Health and Environmental Risks
AQSIQ, 2007	China	GB 20922-2007. The Reuse of Urban Recycling Water—Quality of Farmland Irrigation Water
AQSIQ, 2010	China	GB/T 25499-2010. The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Green Space Irrigation
WAI, 2010	Israel	Effluent Quality Standards and Rules for Sewage Treatment (Sustituye a WAI, 1992)
EPA, 2012	USA	Guidelines for Water Reuse (Revisión EPA, 2004)
AQSIQ, 2020	China	GB/T 18920-2020. The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use (Sustituye a AQSIQ, 2002b)
		Dentro de Europa
MEECCG, 2002	Grecia	Measures and Conditions for Processing Municipal Wastewater
MHI, 2003	Italia	The Regulating Technical Standards for Wastewater Reuse
MANREC, 2005	Chipre	General Conditions for Disposing of Waste from Municipal Wastewater Treatment Plants
IQP, 2005	Portugal	The Guidelines for Good Practice of Water Reuse for irrigation: Portuguese standard
RD 1620/2007	España	Reglamento Español de Reutilización de Aguas
MSAPHF, 2010	Francia	Regulations on the Reuse of Irrigation Water for Agriculture and Green Space
MEECCG, 2011	Grecia	Determination of Measures, Conditions and Procedures for the Reuse of Treated Wastewater and Other Provisions
MSAPHF, 2014	Francia	Regulations on the Reuse of Irrigation Water for Agriculture and Green Space (Revision de MSAPHF, 2010)
		Unión Europea
Reglamento (UE) 2020/741	Unión Europea	Requisitos mínimos para la reutilización del agua

En este contexto de variedad de regulaciones para el riego con agua regenerada, la Unión Europea publicó, el 25 de mayo de 2020, el Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua (entrada en vigor el 26 de junio de 2023) (Tabla 1). Su finalidad es la de garantizar que las aguas regeneradas sean seguras para el riego agrícola, y de esta forma asegurar un alto nivel de protección del medio ambiente y de la salud humana y la sanidad animal, promover la economía circular, apoyar la adaptación al cambio climático, y contribuir a los objetivos de la Directiva 2000/60/CE al hacer frente a la escasez de agua y a la consiguiente presión sobre los recursos hídricos de manera coordinada en toda la Unión, contribuyendo así además al funcionamiento eficaz del mercado interior. De esta forma, el reglamento establece requisitos mínimos de calidad y control del agua y disposiciones sobre gestión del riesgo, para la utilización segura de las aguas regeneradas en el contexto europeo de una gestión integrada del agua.

En el contexto del uso de las aguas regeneradas para riego, el reglamento define tres tipos de cultivos, cuatro clases de calidad de las aguas regeneradas y los usos y métodos de riego permitidos en cada clase, así como los requisitos mínimos de calidad de las aguas asociados a cada clase. La Tabla 2 presenta los requisitos mínimos aplicables a las aguas regeneradas destinadas al riego agrícola.

Tabla 2. Requisitos mínimos aplicables a las aguas regeneradas destinadas al riego agrícola. Fuente: Elaboración propia a partir de Reglamento (UE) 2020/741

	Clase			
	A	**B**	**C**	**D**
Categoría de cultivo *	Todos los cultivos de alimentos que se consumen crudos en los que la parte comestible está en contacto directo con las aguas regeneradas y los tubérculos que se consumen crudos	Los 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 aguas regeneradas, los cultivos de alimentos transformados y los cultivos no alimenticios, incluidos los cultivos utilizados para alimentar a animales productores de carne o leche		Cultivos destinados a la industria y a la producción de energía y de semillas
Método de riego	Todos los métodos de riego	Todos los métodos de riego	Riego por goteo u otro método de riego que evite el contacto directo con la parte comestible del cultivo	Todos los métodos de riego
	Requisitos de calidad de las aguas regeneradas para el riego agrícola			
***E. coli* (número/100 ml)**	≤ 10	≤ 100	≤ 1000	≤ 10.000
DBO5 (mg/L)	≤ 10	≤ 25 (Directiva 91/271/CEE)		
STS (mg/l)	≤ 10	≤ 35 (Directiva 91/271/CEE)		
Turbidez (UNT)	≤ 5	-	-	-
Otros	*Legionella* spp.: < 1 000 UFC/l cuando exista un riesgo de aerosolización Nematodos intestinales (huevos de helmintos): ≤ 1 huevo/l para el riego de pastos o forraje			

(*) En caso de que un tipo determinado de cultivo regado corresponda a varias categorías del cuadro 1, se le aplicarán los requisitos de la categoría más estricta.

4.2. Instalaciones para la regeneración de agua

El Reglamento (UE) 2020/741 define las aguas regeneradas como las aguas residuales urbanas que han sido tratadas en cumplimiento de los requisitos establecidos en la Directiva 91/271/CEE y que resultan de un tratamiento posterior en una estación regeneradora de aguas, de conformidad con los requisitos de calidad de agua mostrados en la Tabla 2. Así mismo, define la estación regeneradora de aguas como una estación depuradora de aguas residuales urbanas u otra instalación para el tratamiento posterior de las aguas residuales urbanas que cumpla los requisitos establecidos en la Directiva 91/271/CEE a fin de producir agua apta para los fines descritos en la Tabla 2.

En la Tabla 3 se muestra un ejemplo de concentración promedio de los indicadores de contaminación fecal más representativos presentes en el agua residual (INCO 2001). Los valores mostrados son típicos de núcleos de población residenciales, donde las aguas residuales son generadas por actividades humanas asimilables a domésticas. Se debe resaltar sin embargo que estos valores pueden sufrir variaciones debido a factores en el origen de las aguas residuales, como aguas industriales, actividad ganadera, achiques de aguas del subsuelo y pluviometría, entre otras.

Tabla 3. Concentración promedio de los indicadores de contaminación fecal en aguas residuales. Fuente: INCO (2001)

Parámetro	CF	EC	ENT	CP	SOM	F+	GIA
UFC/100 (log)	6,99	7,27	6,07	5,44	6,35	5,58	3,03

CF: coliformes fecales; EC: E. coli; ENT: enterococos; CP: Clostridium perfringens; SOM: fagos somáticos; F+: fagos F+; GIA: Giardia spp,

En las etapas de depuración (Figura 5), las aguas residuales se someten a procesos físicos, químicos y biológicos que reproducen en corto tiempo, y en un espacio reducido, las fases que ocurren en los procesos naturales de autodepuración de los sistemas acuáticos. Sin embargo, los sistemas actuales son capaces de reducir de una forma limitada la presencia de los microorganismos, antes de llegar a la etapa de desinfección (Tabla 4). Como se puede observar, el tratamiento primario tiene sólo un efecto limitado en la eliminación de microorganismos (<1), donde sólo los organismos de mayor peso y tamaño y los asociados a partículas sólidas sedimentables podrán decantar. Por otro lado. los procesos de tratamiento tales como filtros percoladores, fangos activados y lagunaje, basados principalmente en mecanismos de adsorción y predación, reducen en mayor medida la concentración de microorganismos presentes en el agua, pero no llegan a una eliminación completa y requerida en el Reglamento (UE) 2020/741.

En conclusión, se puede inferir que la eliminación de patógenos es muy reducida en los tratamientos previos a la desinfección (Abellán, 2018) y, por lo tanto, para que el agua pueda ser utilizada en el riego agrícola y cumplir con los criterios de calidad marcados en el Reglamento (UE) 2020/741 son necesarios tratamientos de desinfección posteriores a la depuración del agua (Kuo, 2017). Los principales tratamientos de desinfección son la cloración, la aplicación de luz ultravioleta y el ozono, mientras que los principales tratamientos de membrana son la microfiltración, la ultrafiltración, la nanofiltración, la ósmosis inversa y la electrodiálisis reversible (Figura 6).

Tabla 4. Reducción de indicadores de contaminación fecal en diferentes sistemas de tratamiento. Fuente: INCO (2001)

	Eliminación (log)					
Sistema	CF	ENT	CP	SOM	F+	GIA
Sedimentación primaria	0,5	0,4	0,4	0,3	0,3	0,7
Lodos activados	1,6	1,4	1,0	1,5	1,6	1,5
Lagunas de estabilización	3,0	2,6	1,5	2,4	2,3	2,0
Filtros de arena	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	-
Filtros de anilla	0,2	<0,1	<0,1	0,3	0,5	-

CF: coliformes fecales; ENT: enterococos; CP: Clostridium perfringens; SOM: fagos somáticos; F+: fagos F+; GIA: Giardia spp,

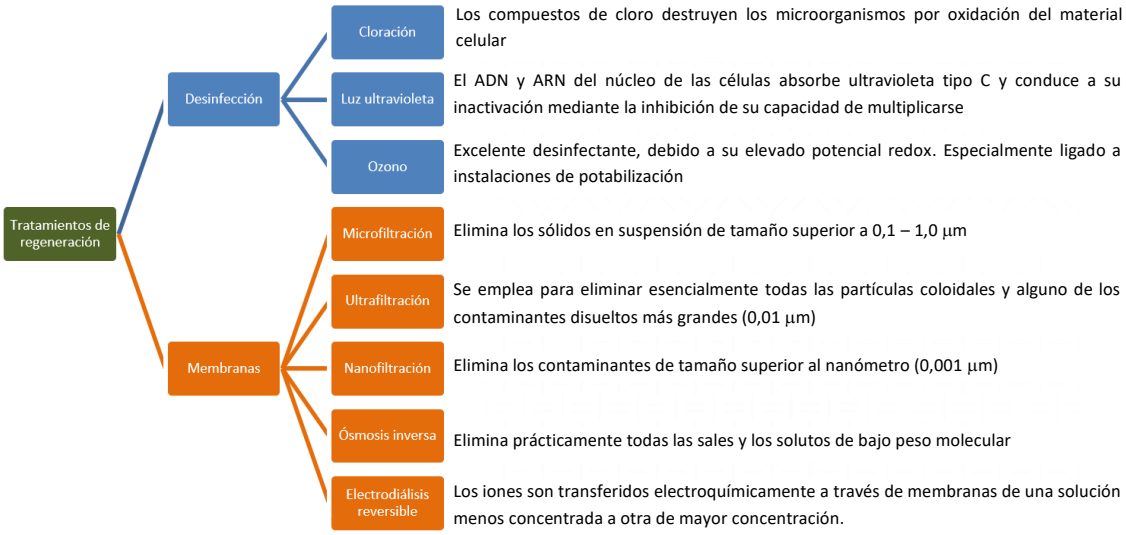


Figura 6. Tecnologías más empleadas para la regeneración del agua depurada. Fuente: Elaboración propia a partir de Díaz-Delgado (2003) y Abellán (2018)

En relación con los tratamientos de desinfección, los compuestos de cloro son los desinfectantes más usados en todo el mundo para el tratamiento del agua residual doméstica al objeto de evitar infecciones. Estos compuestos pueden ser suministrados, entre otras formas, como cloro gas (Cl_2), hipoclorito sódico (líquido) (NaOCl), hipoclorito cálcico (sólido) ($Ca(OCl)_2$) y dióxido de cloro (ClO_2), y destruyen los microorganismos por oxidación del material celular. El más utilizado es sin duda el NaOCl, que puede ser fabricado en la propia depuradora y, por lo tanto, presenta ventajas económicas y de seguridad. Cuando el NaOCl se añade al agua, se produce su hidrolisis e ionización para formar ácido hipocloroso (HOCl) e hipoclorito de sodio ($OHNa^+$); la suma de ambos es el cloro libre disponible tras el breakpoint. Se ha demostrado que la eficacia germicida de la desinfección con cloro depende principalmente del cloro residual bactericida presente, independientemente de si se encuentra en su forma libre o combinada, y del tiempo de contacto (Abellán, 2018). La Tabla 5 muestra el porcentaje de supervivencia de *E. coli* para diferentes tiempos de contacto y diferentes concentraciones de cloro libre.

La aplicación de radiación ultravioleta mediante reactores de lámparas de baja presión de vapor de mercurio impide la capacidad de multiplicación de las células al provocar la dimerización de la timina; i.e. daño en el ADN. Cuando el ADN es dañado de esta forma ya no puede replicarse,

aunque se debe resaltar que en ciertas condiciones existen células que son capaces de revertir este proceso mediante un mecanismo de reparación, denominado reparación luminosa y reparación oscura. Una solución bastante aceptada e implantada en algunas EDAR es el uso combinado de luz ultravioleta de baja presión junto con una dosificación mínima de NaOCl, que aporta un agente desinfectante que además evita recontaminaciones.

Tabla 5. Porcentaje de supervivencia de *E. coli* para diferentes tiempos de contacto y diferentes concentraciones de cloro libre. Fuente: Tchobanoglous *et al*. (2002)

Cloro libre	**Supervivencia de *E. coli* (%)**				
	Tiempo de contacto (min)				
	1	3	5	10	20
0,05	97	82	63	21	0,3
0,07	93	60	25	0,5	-
0,14	67	11	0,7	-	-

Por otra parte, el ozono (O_3) es un oxidante químico muy potente que puede ser usado para la degradación de compuestos contaminantes (Figura 6). El ozono es bastante inestable en disoluciones acuosas y su corta vida media no permite su almacenamiento. De forma breve, un sistema de desinfección mediante ozono incluye: (i) la preparación del gas de alimentación, (ii) la generación de ozono, (iii) el sistema de contacto con el ozono y (iv) un sistema de destrucción del ozono excedente. La técnica denominada de plasma frío es el método más empleado en la actualidad. En esta técnica, se hace pasar oxígeno (o aire desecado) a través de un campo eléctrico (generado entre un electrodo de media tensión, con una diferencia de potencial de 10 a 20 kV, y un electrodo de masa), originándose distintas especies químicas que acaban dando lugar al ozono.

Con respecto a los tratamientos basados en membranas, la Figura 7 muestra el tipo de microorganismo que puede ser retenido según diferentes filtraciones.

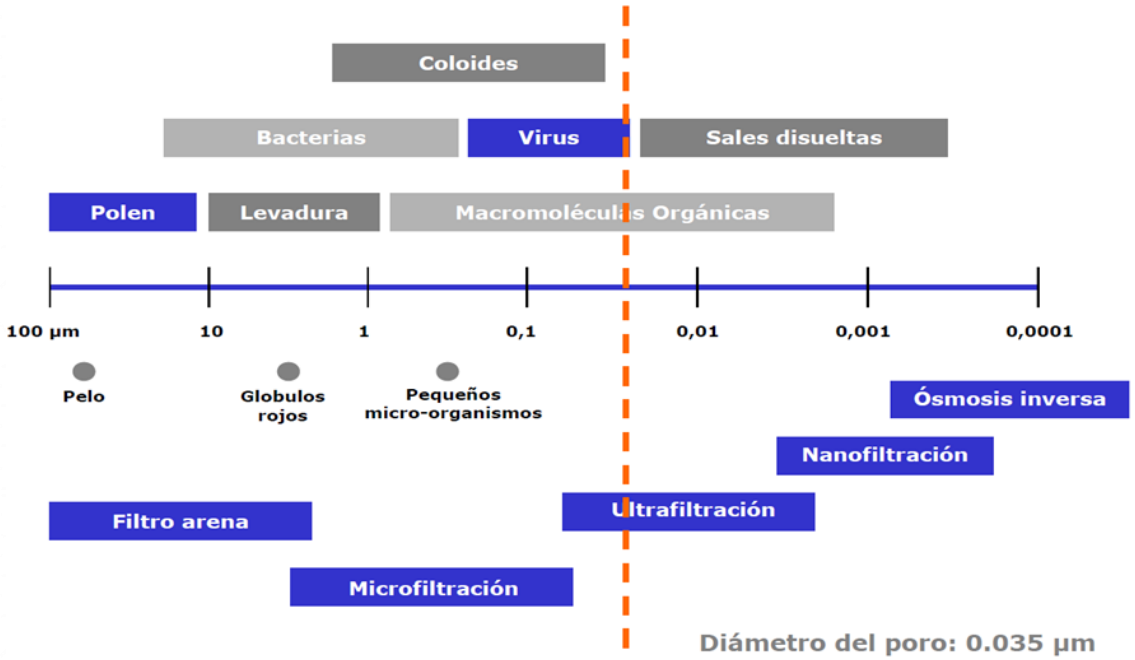


Figura 7. Microorganismos retenidos según diferentes filtraciones. Fuente: Abellán (2018)

La microfiltración permite eliminar los sólidos en suspensión de tamaño superior a 0,1 – 1,0 µm. Es efectiva eliminando los patógenos de gran tamaño como *Giardia* y *Cryptosporidium*. Se suele implementar especialmente como pretratamiento de sistemas con las membranas más sensibles, como la ósmosis inversa o la nanofiltración. La **ultrafiltración** permite eliminar esencialmente todas las partículas coloidales y alguno de los contaminantes disueltos más grandes (0,01 µm). Se utiliza cuando deben eliminarse prácticamente todas las partículas coloidales; incluyendo la mayor parte de microorganismos patógenos. Estos sistemas son capaces de eliminar bacterias y virus y se suelen utilizar como pretratamiento para sistemas de nanofiltración y ósmosis inversa. Habitualmente, son los sistemas seleccionados cuando se instala un reactor biológico de membranas (MBR) asociado al tratamiento secundario. La **nanofiltración** permite eliminar los contaminantes de tamaño superior al nanómetro (0,001 µm). Se emplean cuando se requiere eliminar prácticamente, aunque no todos, los sólidos disueltos. La tecnología se llama también ablandamiento por membrana, ya que se eliminan del agua los iones de la dureza que tienen dos cargas; i.e. calcio y magnesio, mejor que los que solo tienen una; i.e. sodio, potasio, cloruro. La **ósmosis inversa** elimina prácticamente todas las sales disueltas y total de los sólidos de bajo peso molecular en suspensión. Las membranas de ósmosis inversa son la elección cuando la fuente es principalmente agua salobre o marina. Finalmente, la **electrodiálisis reversible** separa las moléculas o iones en un campo eléctrico debido a la diferencia de carga y de velocidad de transporte a través de la membrana. Las membranas tienen espacios cargados y poros bastante estrechos (1-2 nm). En la célula de electrodiálisis se sitúa un cierto número de membranas de intercambio catiónico y aniónico entre un ánodo y un cátodo, de forma que cuando se aplica la corriente eléctrica los iones con carga positiva migran a través de la membrana de intercambio catiónico y viceversa.

5. Características físico-químicas del agua regenerada

Definir las características físico-químicas de un agua regenerada es una tarea compleja puesto que éstas dependen en gran medida del origen urbano-industrial de las aguas residuales que se tratan, y por lo tanto, se encuentran condicionadas a cada estación regeneradora de agua. De una forma general y desde un punto de vista agronómico, una de las características más relevante en la que coinciden la mayor parte de los efluentes municipales es su significativa concentración de nutrientes vegetales inorgánicos esenciales y materia orgánica (Elgallal *et al.*, 2016; Nicolás *et al.*, 2018; Shtull-Trauring *et al.,* 2020). La Tabla 6 muestra un ejemplo de la calidad de diferentes aguas regeneradas producidas por siete plantas de tratamiento en el sureste de España y compara su calidad con la de un agua convencional característica de la zona; agua suministrada mediate el transvase Tajo-Segura (Maestre-Valero *et al.*, 2009). Para estas plantas se observa como las concentraciones de PO_4^{-3} NO^{3-} y especialmente de K^+ son más elevadas que las del agua convencional y, por lo tanto, desde un punto de vista de prácticas agronómicas eficientes y sostenibles, estos nutrientes deberían de ser considerados en los programas de fertirrigación. Por otro lado, se observa una conductividad eléctrica del agua (CE_a) de las plantas que varía entre 1,2 y 3,0 dS/m, que es superior a la CE_a de 0,8 dS/ m observada en el agua convencional. En ocasiones, en plantas de tratamiento ubicadas cerca de la costa, estas CE_a son aún mayores, circunstancia que se justifica por las posibles infiltraciones marinas en los colectores de alcantarillado debido a su deterioro. Un ejemplo de elevadas CE_a son las aguas

regeneradas suministradas por las depuradoras de San Pedro, San Javier y Los Alcázares, ubicadas próximas al Mar Menor, con valores medios de CE_a de 6,2, 3,4 y 5,7 dS/m, respectivamente (datos no mostrados). Se debe resaltar, sin embargo, que otras plantas de interior muestran valores de CE_a más reducidos (Tabla 6). Adicionalmente, las concentraciones de B^{3+}, y especialmente las de Na^+ y Cl^- suelen ser superiores a las de las aguas convencionales y éstas, al igual que ocurre con la CE_a, se incrementan a medida que la ubicación de las plantas se acerca a la costa.

6. Consideraciones agronómicas del riego con agua regenerada

6.1. Riesgo de sodificación del suelo

Un aspecto de elevada relevancia es la posible degradación de la estructura del suelo por alcalinización, circunstancia que puede afectar en gran medida al rendimiento de los cultivos. Este riesgo se encuentra asociado con la relación entre la concentración de Na^+ y la de los cationes divalentes Ca^{2+} y Mg^{2+} mediante el denominado ratio de adsorción de sodio (RAS) (Richards 1954; Ayers y Westcot, 1985).

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$$

donde, Na^+, Ca^{2+} y Mg^{2+} se expresan en meq/L.

Un exceso de Na^+ en el agua de riego, como ocurre en la mayoría de las aguas regeneradas, favorece la dispersión del suelo cuando el Na^+ supera al Ca^{2+} en más de una proporción de 3:1 (Ayers y Westcot, 1985). Esta dispersión, a menudo provoca un grave problema de infiltración de agua debido a al taponamiento y sellado de los poros superficiales. Esto se debe principalmente a la falta de suficiente Ca^{2+} para contrarrestar los efectos dispersantes del Na^+. Los principales efectos asociados a la alcalinización del suelo son: (i) reducción de la conductividad hidráulica, (ii) incremento de la erosión, (iii) compactación, y (iv) disminución de la aireación (Mandal *et al*., 2008; Muyen *et al.,* 2011). Poniendo de nuevo como ejemplo los registros de calidad de agua, CE_a y RAS, de la Tabla 6, la Figura 8 muestra el riesgo de alcalinización del suelo a medio-largo plazo al riego con diferentes aguas regeneradas.

Como se observa en la Tabla 6, todas las aguas regeneradas presentaron elevadas concentraciones de Na^+ y tasas de RAS. Sin embargo, la combinación de RAS y CE_a no mostró sodicidad, con la excepción de la planta de tratamiento de La Unión que presentó un riesgo leve a moderado en la reducción de la infiltración (Figure 8), debido a su reducida CE_a y su elevada concentración de Na^+. Sin embargo, como la CE_a del agua de la planta de La Unión no fue demasiado elevada (CE_a = 1,2 dS/m; Tabla 6), la mitigación de los riesgos de sodicidad podría abordarse mediante el ajuste de los programas de fertirrigación y/o la mezcla con otras aguas más duras, al objeto de incrementar la concentración de Ca^{2+} y Mg^{2+} y desplazar el Na^+ del complejo de intercambio del suelo. Independientemente de los resultados aquí mostrados, el impacto de cada fuente de agua en la alcalinización del suelo debería de analizarse de una forma independiente atendiendo a la Figura 8.

Tabla 6. Propiedades químicas del agua convencional y del agua regenerada producida por varias depuradoras ubicadas en el sureste de España (valor medio ± desviación estándar). Fuente: Maestre-Valero *et al.* (2019)

		Campo de Cartagena			Vega Media del Río Segura			
Unidades	**Agua convencional (1)**	**Torre Pacheco (2)**	**Roldán (3)**	**La Unión (4)**	**Caravaca de la Cruz (5)**	**El Moralejo (6)**	**Valentín (7)**	**Mazarrón (8)**
pH	8,3±0,3	7,8±0,2	7,8±0,1	7,9±0,1	7,6±0,2	7,6±0,2	7,7±0,2	7,6±0,3
CE_a dS/m	0,8±0,2	1,5±0,4	1,4±0,2	1,2±0,1	1,9±0,2	1,7±0,4	1,9±0,2	3,0±0,0
Ca^{2+} mg/L	94,0±16,0	65,7±8,4	58,7±16,8	46,3±5,7	120,1±14,8	111,9±15,1	187,5±34,6	90,4±7,4
Mg^{2+} mg/L	41,0±9,6	29,4±10,9	21,5±16,5	14,9±3,2	36,9±3,7	24,7±2,2	70,8±12,5	71,3±4,0
Na^{+} mg/L	44,0±16,1	207,6±75,0	197,1±31,5	176,6±24,1	252,5±29,6	230,9±100,2	146,3±24,6	435,0±100,5
K^{+} mg/L	3,3±1,3	31,3±3,7	29,8±3,5	30,7±3,6	20,3±1,8	26,8±2,8	16,1±2,2	42,9±10,4
NH^{4+} mg/L	0,20±0,5	3,1±3,6	4,2±3,3	0,7±0,8	1,7±1,2	4,1±9,0	4,8±4,5	3,5±1,6
B^{3+} mg/L	0,18±0,03	0,6±0,3	0,7±0,2	0,7±0,1	0,1±0,0	0,1±0,0	0,2±0,0	0,4±0,1
Cl^{-} mg/L	59,0±40,3	320,3±129,8	274,2±84,2	248,5±48,7	326,0±40,5	266,5±121,5	200,2±24,8	763,7±50,7
$SO4^{-2}$ mg/L	220,0±72,1	148,5±73,1	123,4±68,3	107,8±20,0	165,1±23,9	136,9±15,6	496,5±112,9	259,4±68,1
CO_3H^{-} mg/L	200,0±31,3	248,0±45,9	256,0±20,1	189,7±26,0	385,5±42,3	342,1±83,9	306,5±52,2	343,1±15,8
NO_3^{-} mg/L	1,7±3,5	7,9±2,4	8,7±2,6	2,8±1,0	3,9±2,2	69,3±30,7	4,1±3,8	6,0±3,4
PO_4^{-3} mg/L	0,1±0,04	1,6±1,0	1,9±1,2	2,1±1,4	3,0±1,0	17,2±4,5	3,3±2,3	2,8±1,0
RAS $[meq/L]^{0.5}$	0,95±0,8	5,3±1,5	5,6±0,8	5,8±1,0	5,2±0,5	5,2±2,5	2,3±0,4	8,3±1,9

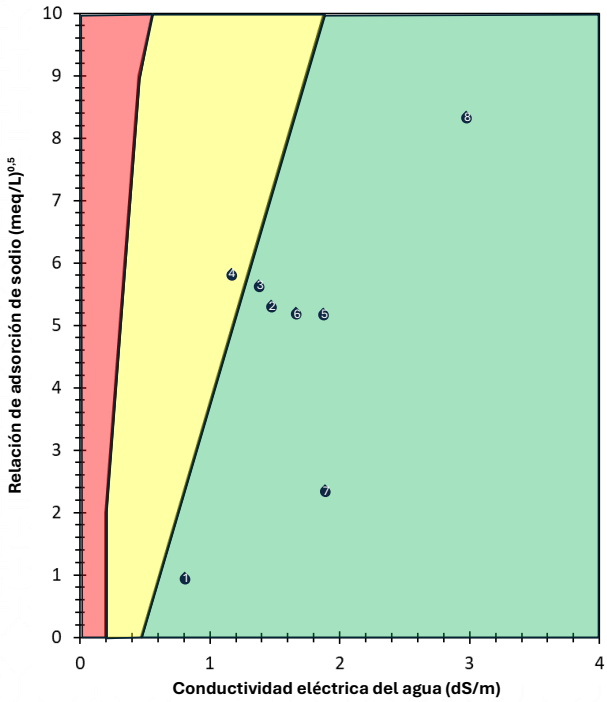


Figura 8. Potencial de sodicidad del suelo a medio-largo plazo al riego con agua regenerada producidos en las plantas de tratamiento de aguas residuales mostradas en la Tabla 6, evaluado mediante ratio de adsorción de sodio y la conductividad eléctrica del agua de riego. Fuente: Ayers y Westcot (1985)

6.2. Rendimiento de cultivos y salinidad

La productividad de los cultivos se ve limitada por la salinidad del agua de riego (Maas y Hoffman, 1977). Cuando los cultivos se riegan con agua con una conductividad eléctrica que supera su umbral de toxicidad (Ayers y Westcot, 1985), se produce un estrés osmótico que puede derivar principalmente en una reducción de la absorción de agua, comportamiento que perjudica el desarrollo de las plantas y promueve una potencial pérdida de rendimiento (Hopmans *et al.,* 2021). Esta cuestión ha sido ampliamente estudiada y tratada en las distintas versiones del Manual Técnico de la FAO Water Quality for Agriculture (Ayers y Westcot, 1985) y subsecuentes trabajos de otros autores (Maas y Grattan, 1999; Drechsel *et al.,* 2023). El rendimiento relativo de un cultivo en función de la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo (CE_{es}) se expresa habitualmente como la producción del cultivo obtenida en condiciones de salinidad dividida por la producción del cultivo obtenida en ausencia salinidad. En los trabajos anteriormente referenciados, se constata que el rendimiento relativo de los cultivos se mantiene constante a medida que aumenta la salinidad del suelo hasta llegar a un determinado valor (umbral de CE_{es}), a partir del cual el rendimiento relativo desciende de modo aproximadamente lineal con la salinidad, según se representa en la Figura 9.

Esta función se expresa matemáticamente mediante la expresión:

$$Y_r = 100 - b\,(CE_{es} - a)$$

donde el eje Y es la producción relativa (Y_r) respecto a la productividad característica del cultivo en ausencia salinidad, a es el umbral de conductividad eléctrica del suelo a partir de la cual el cultivo comienza a perder producción por salinidad, y b es la pendiente de la recta, que indica

el porcentaje de pérdida de producción del cultivo en función del aumento de la salinidad del suelo. El valor de CE_{es} se estima habitualmente como 1,5 veces el valor de la conductividad eléctrica del agua de riego (CE_a). La mayoría de los cultivos herbáceos y leñosos tienen tabulados estos parámetros, lo cual permite evaluar su tolerancia a la salinidad (Maas y Hoffman, 1977; Ayers y Westcot, 1985, Maas y Grattan, 1999). La Tabla 7 muestra los valores de a, b y max CE_{es} característica de los cultivos más representativos del área donde se encuentran las depuradoras indicadas en la Tabla 6.

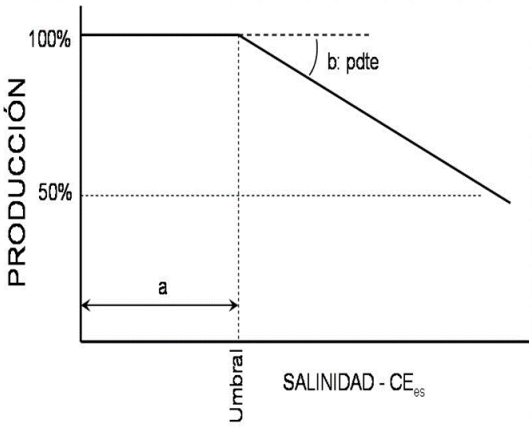


Figura 9. Función de producción de los cultivos en función de la salinidad. Fuente: Maas y Hoffman (1977)

Tabla 7. Parámetros a y b de la función de producción, y conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que produce una disminución del rendimiento del 100% (maxCEes) para cultivos representativos del sureste de España. Fuente: Adaptado de Ayers y Westcot (1985) y Maas y Grattan (1999)

Cultivo	a (CE_{es} umbral, dS/m)	b (pendiente, %)	maxCE_{es} (dS/m)
Alcachofa	6,1	11,5	14,8
Brócoli	2,8	9,2	14,0
Lechuga	1,3	13	9,0
Melón	1,0	8,4	12,9
Limón	1,5	12,8	9,3
Mandarino	1,7	13,1	8,0
Naranjo	1,7	13,1	8,0
Albaricoque	1,6	24	5,8
Melocotón	1,7	21	6,5
Almendro	1,5	19	6,8

En este contexto, algunas aguas regeneradas pueden presentar elevada CE_a, que es normalmente superior a la correspondiente al agua convencional (Tabla 6). La Figura 10, considerando las aguas regeneradas de la Tabla 6 con menor y mayor CE_a; i.e. La Unión (CE_a = 1,2 dS/m) y Mazarrón (CE_a = 3,0 dS/m), respectivamente, muestra los valores obtenidos de la producción relativa (Y_r) respecto a la productividad característica del cultivo en ausencia de salinidad. En este sentido, regar con agua regenerada producida en estación de La Unión no tendría ningún efecto negativo sobre la producción de ninguno de estos cultivos, mientras que regar con agua suministrada por la planta de Mazarrón, supondría pérdidas de rendimiento de 1,84% en brócoli, 16,8% en melón, 17,3% en mandarino y naranjo, 19,2% en limón, 22,1% en

lechuga, 27,3% en melocotón, 28,5% en almendro y 33,6% en albaricoque. Sin embargo, no supondría pérdidas de producción en alcachofa.

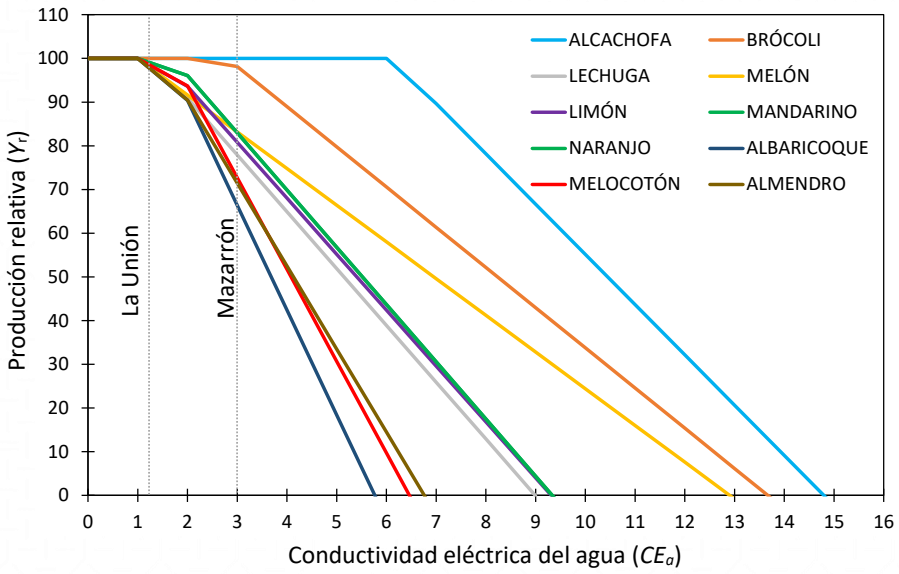


Figura 10. Rendimiento de los cultivos en función de la conductividad eléctrica del agua regenerada de La Unión (CE_a = 1,2 dS/m) y Mazarrón (CE_a = 3,0 dS/m) (Tabla 6)

Estos impactos negativos en la producción se han descrito en investigaciones previas. Por ejemplo, Pedrero *et al*. (2014), regaron con agua regenerada con CE_a = 3 dS/m durante 7 años un huerto de mandarinos variedad Clementina sobre patrón Carrizo en el sureste de España y obtuvieron el último año de ensayo (2013) una reducción de la producción de un 40%. En pomelo variedad Star Ruby sobre patrón Macrophylla regado con agua regenerada con CE_a = 3 dS/m, Romero-Trigueros *et al.* (2014) detectaron pérdidas de rendimiento del 20% provocadas principalmente por una reducción de la carga de frutos del árbol. Vicente-Sanchez *et al.* (2014), en un cultivo de lechuga variedad Iceberg regado con agua regenerada con una CE_a = 4,19 dS/m calculó una reducción notable del crecimiento de las lechugas. En almendro variedad Genco sobre patrón Rootpak 20, el riego durante 1 año con agua regenerada con CE_a = 3 dS/m no produjo ningún efecto en el peso fresco de la cáscara, peso fresco del casco, o peso fresco del grano, pero sí una reducción del 18% en la productividad del agua (kg/m3) (Vivaldi *et al*., 2019).

6.3. Impacto de la salinidad en los requerimientos de riego

Las necesidades totales de riego (N_t) de los cultivos son superiores a sus necesidades consuntivas o netas (N_n), ya que se necesitan cantidades adicionales de agua para compensar las pérdidas debidas a las condiciones en las que se desarrolla el cultivo (Doorenbos y Pruit, 1977). Uno de los aspectos esenciales para cuantificar los requerimientos de riego es la salinidad del agua, ya que estos aumentan a medida que lo hace la salinidad al objeto de lavar las sales del perfil del suelo donde se encuentran las raíces. Siguiendo el manual técnico de la FAO *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements* (Doorenbos y Pruit, 1977), y dejando de lado otras consideraciones locales sobre la textura del suelo o la uniformidad de emisión del sistema de riego, la N_t se calcula como:

$$N_t = \frac{N_n}{(1 - RL)}$$

$$RL = \frac{CE_a}{maxCE_{es}}$$

donde RL es el requerimiento de lavado y max CE_{es} es la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo para un descenso de la producción de un 100%, valor que se encuentra tabulado en distintos manuales de referencia (Ayers y Westcot, 1985; Mass y Grattan, 1999).

Tabla 8. Fracción de lavado mínima (RL, %) para cada cultivo representativos del sureste de España en base a la conductividad eléctrica del agua regenerada de La Unión (CE_a = 1,2 dS/m) y Mazarrón (CE_a = 3,0 dS/m) y a la máxima conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo ($MaxCE_{es}$)

Cultivo	$MaxCE_{es}$ (dS/m)	La Unión (CE_a = 1,2 dS/m)	Mazarrón (CE_a = 3,0 dS/m)
Alcachofa	14,8	8,1%	20,3%
Brócoli	14,0	8,6%	21,4%
Lechuga	9,0	13,3%	33,3%
Melón	12,9	9,3%	23,3%
Limón	9,3	12,9%	32,3%
Mandarino	8,0	15,0%	37,5%
Naranjo	8,0	15,0%	37,5%
Albaricoque	5,8	20,7%	51,7%
Melocotón	6,5	18,5%	46,2%
Almendro	6,8	17,6%	44,1%

Por lo tanto, se puede observar que regar con un agua más salina como es el caso del agua producida en la planta de Mazarrón supondrá unos requerimientos de lavado muy superiores a los que se debieran aplicar en el caso de regar con aguas menos salinas.

6.4. Iones fitotóxicos en el agua regenerada

Las aguas regeneradas pueden presentar concentraciones elevadas de elementos fitotóxicos como Cl^-, Na^+ y B^{3+} (Tabla 6). La acumulación de estos elementos a lo largo del tiempo por encima de determinados umbrales puede dañar los tejidos y afectar negativamente a procesos metabólicos que dan lugar a reducciones del rendimiento (Grattan *et al*., 2015). En general, los elementos fitotóxicos interfieren directamente en los procesos fisiológicos esenciales o indirectamente en la homeostasis planta-nutriente a través de mecanismos como la competencia entre la captación de Na^+ y K^+ (Kronzucker *et al.,* 201; Arif *et al.,* 2020; Drechsel *et al.*, 2023). Los síntomas típicos incluyen inhibición del crecimiento y necrosis, con frecuente reducción del rendimiento (epígrafe 1.7) y de la calidad del producto (Maas, 1987; Xu *et al.,* 1999; Grattan *et al.,* 2015; Poustie *et al*., 2020; Kisekka *et al*., 2023). Es importante resaltar que los cultivos permanentes y perennes son más sensibles a las toxicidades específicas de los iones que los cultivos estacionales o anuales. La Tabla 9 muestra, para los cultivos más representativos del sureste español, las concentraciones máximas aceptadas de Cl^-, Na^+ y B^{3+} en el agua de riego o en el agua del suelo. Si se atiende de nuevo los valores de Cl^-, Na^+ y B^{3+} mostrados en la Tabla 6, y se comparan con los presentados en la Tabla 9, se puede por lo tanto discernir para cada caso si pueden existir problemas de fitotoxicidad causados por la acumulación de estos iones en el medio-largo plazo.

Tabla 9 Concentraciones máximas permisibles de Cl^-, Na^+ y B^{3+} para evitar problemas de toxicidad en diversos cultivos

Cultivo	Concentración máxima de Cl^- (mg/L) en agua de riego	Concentración máxima de Cl^- (mg/L) en el agua del suelo	Concentración máxima de Na^+ (mg/L) en el agua del suelo	Concentración máxima de B^{3+} (mg/L) en el agua del suelo	Referencia
Melón	-	-	-	2–4	Hanson *et al.* (2006)
Lechuga	-	350	-	-	Fipps (1996)
	-	-	-	1,3	Hanson *et al.* (2006)
	-	-	-	1,00–2,05	Muñoz *et al.* (2002)
Brócoli	-	-	-	1,0	Hanson *et al.* (2006)
Tomate	-	875	-	-	Fipps (1996)
	178–355	-	-	-	ANZECC (2000)
	-	-	-	5,7	Grieve *et al.* (2012)
Pimiento	178–355	-	-	-	ANZECC (2000)
Patata	178–355	-	-	1,00–2,05	ANZECC (2000)
Coliflor	710	-	-	-	ANZECC (2000)
Limón	238	-	-	-	Ayers y Wetscot (1985)
		1.070	-	-	Maas y Grattan (1999)
	152	-	-	-	Levy y Syvertsen (2004)
	350	525	-	0,5	Hanson *et al.* (2006)
	-	-	-	0,5	Grieve *et al.* (2012)
	152–238		115	-	Grattan *et al.* (2015)
	-	-	-	0,30–1,00	Muñoz *et al.* (2002)
Naranjo	250–300	-	-	-	Hanson *et al.* (2006)
	-	-	115	-	Grattan *et al.* (2015)
	-	-	-	0,50–0,75	Hanson *et al.* (2006)
Mandarina	-	890	-	-	Grieve *et al.* (2012)
Pomelo	-	890	-	-	Grieve *et al.* (2012)
Melocotón	250	-	-	0,50–0,75	Hanson *et al.* (2006)
	-	-	-	0,30–1,00	Muñoz *et al.* (2002)
Almendro	178	-	-	-	ANZECC (2000)
Albaricoquero	178	-	-	-	ANZECC (2000)
	-	-	-	0,30–1,00	Muñoz *et al.* (2002)
Ciruelo	178	-	-	-	ANZECC (2000)
Viña	178–355	-	-	-	ANZECC (2000)
	-	1250	-	-	Grieve *et al.* (2012)

6.5. Beneficios nutricionales del riego con agua regenerada

Las normativas para el tratamiento de las aguas residuales de muchos países exigen la eliminación de una gran parte de nitrógeno y fósforo (Yalin *et al*., 2023), al objeto de evitar que estos elementos lleguen a las masas de agua superficiales y/o subterráneas, donde pueden tener efectos perjudiciales para el medio ambiente (Shoushtarian y Negahban-Azar, 2020). Sin embargo, si estos nutrientes se tienen en cuenta y se gestionan en función de las necesidades de los cultivos, la presencia de estos y otros elementos en las aguas regeneradas puede reducir considerablemente la aplicación de fertilizantes, reduciendo no sólo los costes sino el impacto medioambiental de su producción. Bar-Tal *et al*. (2010) concluyeron en investigaciones realizadas en Israel que, la fitodisponibilidad de los nutrientes de las aguas regeneradas suele ser equivalente a los fertilizantes minerales y orgánicos comunes. Investigaciones recientes realizadas en este mismo país han demostrado que las aguas residuales tratadas pueden aportar al menos el 50% del N y el 100% del P y el K necesarios para cultivos de baja demanda, como por ejemplo para los cultivos de cítricos y el aguacate (Shtull-Trauring *et al*., 2022). Sin embargo, el suministro de nutrientes a partir de las aguas regeneradas es un reto porque los aportes nutricionales en cada riego se deben de ajustar a las necesidades de los cultivos; necesidades que son cambiantes en función de su etapa fenológica. Por consiguiente, esta circunstancia, si no se maneja agronómicamente de una forma adecuada, puede generar desequilibrios temporales entre el suministro de nutrientes y las necesidades de las plantas (Yalin *et al*. 2023). En este sentido, Maestre-Valero *et al.* (2019) calcularon este desbalance nutricional para los principales cultivos de la Región de Murcia; región ubicada en el sureste de España. La Figura 11 muestra el porcentaje de satisfacción de nutrientes proporcionados por diferentes aguas regeneradas (Tabla 6) en comparación con las necesidades de nutrientes de los cultivos seleccionados por ciclo y por fase de cultivo.

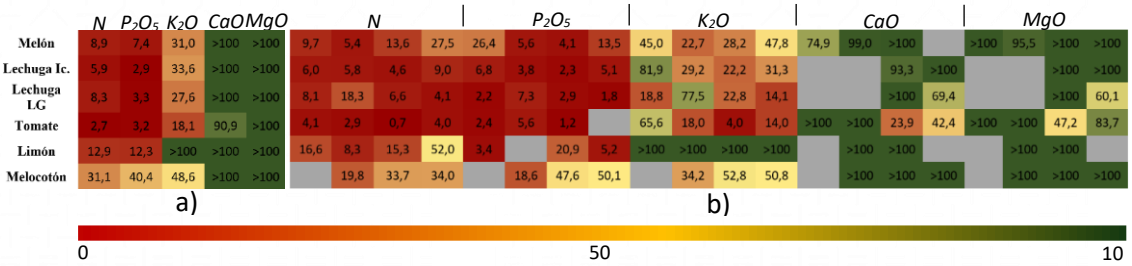


Figura 11. Porcentaje de satisfacción de nutrientes proporcionados por diferentes aguas regeneradas (Tabla 6) en comparación con las necesidades de nutrientes de los cultivos seleccionados por ciclo, (a), y por fase de cultivo (b). Los cuadrados grises representan las fases de cultivo que no requieren ese nutriente. Ic y LG corresponden a las lechugas Iceberg y Little Gem, respectivamente. Fuente: Adaptado de Maestre-Valero *et al*. (2019)

Como se puede observar, cuando se realizó el análisis para el ciclo completo (Figura 11a), algunos elementos presentes en el agua regenerada, como por ejemplo el Mg, satisficieron el 100% de las necesidades de lechuga LG y de tomate. Sin embargo, cuando se consideraron las diferentes fases de estos cultivos (Figura 11b), se observaron deficiencias notables de Mg y Ca en la fase 4 para el cultivo de lechuga (60,1%) y en las fases 3 y 4 para el cultivo de tomate (47,2 y 83,7%, respectivamente). Por lo tanto, estos autores, demostraron que el agua regenerada puede efectivamente suministrar una gran parte de los nutrientes que necesitan los cultivos, especialmente en el caso de los cultivos leñosos. Sin embargo, al objeto de detectar posibles

deficiencias nutricionales, cada fase del cultivo debe analizarse de forma independiente debido a los desajustes temporales entre las necesidades de nutrientes de los cultivos y los nutrientes aportados por el agua (Maestre-Valero *et al*., 2019; Yalin *et al*., 2023). Adicionalmente, se destacó la importancia de considerar los nutrientes presentes de forma intrínseca en las aguas regeneradas puesto que pueden permitir ahorros significativos en los costes de los programas de fertirrigación (Maestre-Valero *et al.,* 2019).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca -Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia y del programa de la Unión Europea NextGenerationEU (AGROALNEXT, PRTR-C17.I1), además del programa Misiones Ciencia e Innovación 2021, Recuperación, Transformación y Plan de Resiliencia, NextGenerationEU, en el marco del proyecto CDTI "SOS AGUA-XXI" (MIG-20211026). Finalmente, se agradece el apoyo de la Cátedra Trasvase y Sostenibilidad – José Manuel Claver Valderas de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Bibliografía

Abellán, M. (2018). La desinfección en la regeneración de efluentes depurados. XXVI Curso sobre tratamiento de aguas residuales y explotación de estaciones depuradoras. CEDEX. Madrid, 19-30.

ANZECC [Australian and New Zealand Environment and Conservation Council]. (2000). Guidelines for fresh and marine water quality. Australian and New Zealand Environment and Conservation Council.

AQSIQ, S.A.C. (2002a). GB/T 18919-2002 The Reuse of Urban Recycling Water—Classified standard. Standards Press of China, Beijing.

AQSIQ, S.A.C. (2002b). GB/T 18920-2002, The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use. Standards Press of China, Beijing.

AQSIQ, S.A.C. (2007). GB 20922-2007 The Reuse of Urban Recycling Water—Quality of Farmland Irrigation Water. Standards Press of China, Beijing.

AQSIQ, S.A.C. (2010). GB/T 25499-2010 The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Green Space Irrigation. Standards Press of China, Beijing.

AQSIQ, S.A.C. (2020). GB / T 18920-2020 The Reuse of Urban Recycling Water—Water Quality Standard for Urban Miscellaneous Use. Standards Press of China, Beijing.

Arif, Y.; Singh, P.; Siddiqui, H.; Bajguz, A.; Hayat, S. (2020). Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: an omic approach towards salt stress tolerance. Plant Physiology and Biochemistry, 156: 64–77. https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.08.042

Asano, T. (2001). "Water from (waste)water – The dependable water resource the dependable water resource (The 2001 Stockholm Water Prize Laureate Lecture)". Water Science & Technology, 45: 8 pp 23–33

Ayers, R.S.; Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture, in: FAO Irrigation and Drainage Paper 29, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 186 pp. https://www.fao.org/3/t0234e/t0234e00.htm

Bar-Tal, A.; Bar-Yosef, B.; Eshel, G.; Singer, M.J. (2010). Major Minerals. Treated Wastewater in Agriculture. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, pp. 129–215. https://doi.org/10.1002/9781444328561.ch5

BIO by Deloitte (2015). Optimising water reuse in the EU – Final report prepared for the European Commission (DG ENV), Part I. In collaboration with ICF and Cranfield University.

CE (2016). Inception Impact Assessment on the initiative "Minimum quality requirements for reused water in the EU (new EU legislation)". Comisión Europea. http://ec.europa.eu/environment/water/reuse.htm

CHS (2022). Memoria del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2022-2027. Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). 334 pp.

CAGPDS (2022). Memoria del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica de las Cuencas Mediterráneas Andaluzas 2022-2027. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible de la Junta de Andalucía (CAGPDS). 193 pp.

Diaz-Delgado, C. (2003). Capítulo 18: Tecnologías innovadoras en la regeneración y reutilización de aguas residuales. En: C. Díaz-Delgado; C. Fall; E. Quentin; M.C. Jiménez-Moleón; M.V. Esteller-Albarich; S.E. Garrido-Hoyos; C.M. López-Vazquez; D. García-Pulido (Eds), Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas. Red Iberoamericana de Potabilización y Depuración del Agua. México: RIPDA-CYTED.

DIRECTIVA 91/271/CEE (1991) Sobre tratamiento de las aguas residuales urbanas

Directiva 2000/60/CE (2000) del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.

Doorenbos, J.; Pruitt, W.O. (1977). Guidelines for predicting crop water requirements. FAO irrigation and drainage paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations. 144 pp. https://www.fao.org/3/f2430e/f2430e.pdf

Drechsel, P.; Zadeh, S.M.; Pedrero-Salcedo, F. (2023). Water Quality in Agriculture: Risks and risk mitigation. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and International Water Management Institute Rome.

Elgallal, M.; Fletcher, L.; Evans, B. (2016). Assessment of potential risks associated with chemicals in wastewater used for irrigation in arid and semiarid zones: a review.

Agricultural Water Management, 177: 419–431. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.08.027

EPHCA, NRMMCA, AHMC, (2006). Australian guidelines for water recycling: managing health and environmental risks (Phase 1).

EWA (2017). E-Water. Official Publication of the European Water Association (EWA).

Fipps, G. (1996). Irrigation water quality standards a8d salinity management strategies, Texas Agricultural Extension Service, Texas, A&M University System, College Station, Texas. B-1667. 19 p.

Grattan, S.R.; Díaz, F.J.; Pedrero, F.; Vivaldi, G.A. (2015). Assessing the suitability of saline wastewaters for irrigation of Citrus spp.: emphasis on boron and specific-ion interactions. Agricultural Water Management, 157: 48–58.

Grieve, C.M.; Grattan, S.R.; Maas, E.V. (2012). Plant Salt Tolerance in Agricultural Salinity Assessment and Management (W.W. Wallender and K.K. Tanji, eds). ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 71, 2nd edition. 405-459. American Society of Civil Engineers (ASCE). Reston, VA

Hanson, B.; Grattan, S.; Fulton, A. (2006). Agricultural Salinity and drainage. Water management series publication, 3375. 157 pp.

Hochstrat, R.; Wintgens, T.; Melin, T.; Jeffrey, P. (2006). Assessing the European wastewater reclamation and reuse potential — a scenario analysis. Desalination, 188(1-3):1-8.

INCO-DC: International Co-operation with Developing Countries (2001). “Evaluation of the usefulness of bacteriophages as model micro-organisms for the assessment of water treatment processes and water quality”. Final Report. European Community 130 pp.

INE (2020). Recogida y tratamiento de las aguas residuales por comunidades y ciudades autónomas, tipo de indicador y periodo.

IPCC (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability; Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 3053 pp.

IQP (2005). The guidelines for good practice of water reuse for irrigation: Portuguese standard NP 4434, IQP.

Jones, E.R.; van Vliet, M.T.H; Qadir, M.; Bierkens, M.F.P. (2021). Country-level and gridded estimates of wastewater production, collection, treatment and reuse. Earth System Science Data, 13: 237–254.

Karimidastenaei, Z.; Avellán, T.; Sadegh, M.; Kløve, B.; Torabi A. (2022), Unconventional water resources: Global opportunities and challenges, Science of The Total Environment, 827: 154429.

Kisekka, I.; Grattan, S.R.; Pedrero-Salcedo, F.; Gan, J.; Partyka, M.; Nirit, B.; Adin, A. (2023). Assessing the state of knowledge and impacts of recycled water reuse for irrigation on agricultural crops and soils. report for project WRF 4964.

Kronzucker, H.J.; Coskun, D.; Schulze, L.M.; Wong, J.R.; Britto, D.T. (2013). Sodium as nutrient and toxicant. Plant Soil 369: 1–23. https://doi.org/10.1007/s11104-013- 1801-2

Kuo, J. (2017). Disinfection Processes. Water Environment Research, 89(10): 1206-1244.

Lazarova, V. (2013) Global milestones in water reuse: keys to success and trends in development. Water 21:12–22

Levy, Y.; Syvertsen, J. (2004). Irrigation water quality and salinity effects in citrus trees. Horticultural Reviews 30: 37-82.

Maas, E.V.; Hoffman, G.J. (1977). Crop salt tolerance – current assessment. Journal of the Irrigation and Drainage Division ASCE, 103, 115–134.

Maas, E.V. (1987). Salt tolerance of plants. In: Hanson, A.A. (Ed.), CRC Handbook of Plant Science in Agriculture Volume II. CRC Press, Boca Raton, pp. 57–75. https://doi.org/10.1201/9780429286735

Maas, E.V.; Grattan, S.R. (1999). Crop yields as affected by salinity. In R.W. Skaggs & J. van Schilfgaarde, eds. Agricultural drainage, pp. 55–108. Madison, WI, ASA-CSSA-SSSA. https://doi.org/10.2134/agronmonogr38.c3

Maestre-Valero, J.F.; gonzález-Ortega, M.J.; Martínez-Alvarez, V.; Gallego-Elvira, B.; Conesa-Jodar, F.J.; Martin-Gorriz, B. (2019). Revaluing the nutrition potential of reclaimed water for irrigation in southeastern Spain. Agricultural Water Management 218: 174–181. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.03.050

Mandal, U.K.; Bhardwaj, A.K.; Warrington, D.N.; Goldstein, D.; Tal, A.B.; Levy, G.J. (2008). Changes in soil hydraulic conductivity, runoff, and soil loss due to irrigation with different types of saline-sodic water. Geoderma, 144: 509–516.

Mateo-Sagasta, J; Raschid-Sally, L; and Thebo, A. (2015). Global Wastewater and Sludge Production, Treatment and Use, in: Wastewater: Economic Asset in an Urbanizing World, edited by: Drechsel, P., Qadir, M., and Wichelns, D., Springer Netherlands, Dordrecht, 15–38.

MEECCG (2002). KYA673/400/199, No. 5673/400, Measures and conditions for processing municipal wastewater, MEECCG. MEECCG. 2011, FEK B 354/08–03-2011, DECISIONS No.co.145116, Determination of Measures, Conditions and Procedures for the Reuse of Treated Wastewater and Other Provisions, MEECCG.

MHI (2003). the Regulating Technical Standards for Wastewater Reuse, MHI.

MHR (1996). SanPiN 2.1.7.573–96, Hygienic requirements to wastewater and sewage sludge use for land irrigation and fertilization, MHR.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Saneamiento y Depuración - Línea de Aguas. https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/saneamiento-depuracion/sistemas-tratamiento/linea_de_agua.html

MLIT (2005). Manual on Water Quality Standards for Reuse of Treated Sewage Water. MLIT. https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha05/04/040422/05.pdf

MSAPHF (2010). Regulations on the reuse of irrigation water for agriculture and green space. MSAPHF. MSAPHF (2014). Regulations on the reuse of irrigation water for agriculture and green space. MSAPHF

Muñoz, E.; de la Fuente, M.M.; Rodríguez, M. (2002). Toxicidad del boro en las plantas. Encuentros en la Biología, Sience Faculty. University of Granada, Spain, Year XI, No. 82.

Muyen, A.; Moore, G.A.; Wrigley, R.J. (2011). Soil salinity and sodicity effects of wastewater irrigation in South East Australia. Agricultural Water Management, 99: 33–41.

Nicolás, E.; Romero-Trigueros, C.; Nortes-Tortosa, P.A.; Pedrero-Salcedo, F.; Bayona-Gambín, J.M.; Maestre-Valero, J.F.; Alarcón-Cabañero, J.J. (2018). Long-Term Physiological and Agronomic Responses of Citrus Irrigated with Saline Reclaimed Water. En: I.F. Garcñia-Tejero; V.H. Durán-Zuazo (Eds). Water Scarcity and Sustainable Agriculture in Semiarid Environment; ELSEVIER

Pedrero, F.; Maestre-Valero, J.F.; Mounzer, O.; Alarcón, J.J.; Nicolás, E. (2014). Physiological and agronomic mandarin trees performance under saline reclaimed water combined with regulated deficit irrigation. Agricultural Water Management 146: 228–237

Poustie, A.; Yang, Y.; Verburg, P.; Pagilla, K.; Hanigan, D. (2020). Reclaimed wastewater as a viable water source for agricultural irrigation: a review of food crop growth inhibition and promotion in the context of environmental change. The Science of the Total Environment 739: 139756. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139756.

Qadir, M.; Sharma, B.R.; Bruggeman, A.; Choukr-Allah, R.; Karajeh, F. (2007). Nonconventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. Agricultural Water Management, 87: 2–22.

Qadir M. (2018). Addressing Trade-offs to Promote Safely Managed Wastewater in Developing Countries. Water Economics and Policy, 4, 2: 1871002 (10 pp)

Real Decreto-ley 11/1995 (1995), de 28 de diciembre, por el que se establecen las normas aplicables al tratamiento de las aguas residuales urbanas.

Real Decreto 1620/2007 (2007), de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas

Reglamento (UE) 2020/741 (2020) del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua.

Richards L.A. (1954). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. USDA Agricultural Handboolt No. 60, US Department of Agriculture J Washington DC. 160 p.

Romero-Trigueros, C.; Nortes, P.A.; Pedrero, F.; Mounzer, O.; Alarcón, J.J.; Bayona, J.A.; Nicolás, E. (2014). Assessment of the viability of using saline reclaimed water in grapefruit in medium to long term. Spanish Journal of Agricultural Research, 12(4): 1137-1148.

Romero-Trigueros, C. (2018). Estudio de viabilidad del uso de agua regenerada y riego deficitario controlado en cítricos. Tesis Doctoral.

Tal. A. (2016). Rethinking the sustainability of Israel's irrigation practices in the Drylands. Water Research, 90: 387-394

UNESCO (2017). The United Nations World Water Development Report 2017, Wastewater: the untapped resource. UNESCO.

UNESCO (2023). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 213 pp.

Urkiaga, A.; Bis, Bárbara.; Hernández, F.; Koksis, T.; Balasz, B.; Chiru, E. (2006). Handbook on feasibility studies for water reuse systems. 160 pp. Proyecto AQUAREC: Integrated Concepts for Reuse of Upgraded Wastewater. www.aquarec.org

Vicente-Sanchez, J.; Nicolás, E.; Pedrero, F.; Alarcón, J.J.; Maestre-Valero, J.F.; Fernández, F. (2014). Arbuscular mycorrhizal symbiosis alleviates detrimental effects of saline reclaimed water in lettuce plants. Mycorrhiza, 24: 339–348

Vivaldi, G.; Camposeo, S.; Lopriore, G.; Romer-Trigueros, C.; Pedrero, F. (2019). Using saline reclaimed water on almond grown in Mediterranean conditions: deficit irrigation strategies and salinity effects. Water Supply,19 (5): 1413–1421.

Shoushtarian, F.; Negahban-Azar, M. (2020). Worldwide regulations and guidelines for agricultural water reuse: a critical review. Water (Switzerland) 12. https://doi.org/10.3390/w12040971

Shtull-Trauring, E.; Cohen, A.; Ben-Hur, M.; Tanny, J.; Bernstein, N. (2020). Reducing salinity of treated wastewater with large scale desalination. Water Research 186: 116322. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116322

Tchobanoglous, G.; Burton, F.; Stensel, H.D. (2002). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (McGraw-Hill Series in Civil and Environmental Engineering; 9780071122504; ISBN: 9780071122504).

WAI (1992). Public Health Ordinance, WAI. WAI, 2010. Public Health Ordinance: Effluent Quality Standards and Rules for Sewage Treatment, WAI.

Ward, F.A. (2022). Enhancing climate resilience of irrigated agriculture: A review. Journal of Environmental Management, 302: 114032.

Xu, G.; Magen, H.; Tarchitzky, J.; Kafkafi, U. (1999). Advances in chloride nutrition of plants. Advances in Agronomy, 68: Pages 97-110, 110A, 110B, 111-150. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60844-5

Yalin, D.; Craddock, H.A.; Assouline, S. *et al*. (2023). Mitigating risks and maximizing sustainability of treated wastewater reuse for irrigation. Water Research X, 21: 100203

Zhao, P.; Ma, M.; Hu, Y.; Wu, W.; Xiao, J. (2022). Comparison of international standards for irrigation with reclaimed water. Agricultural Water Management, 274: 107974

3.2. Marco regulatorio del agua regenerada en la Unión Europea

José María Ferrer Villar

Departamento de Derecho Alimentario de AINIA

jmferrer@ainia.es

Índice

1. Ámbito de aplicación y alcance 276

2. Alcance de la reutilización de aguas regulado, ¿dónde puede emplearse en la actividad agroalimentaria? 277

3. Gestión del riesgo 278

4. Obligaciones legales de los operadores 280

5. Obligaciones relativas al permiso 280

6. Comprobaciones del cumplimiento 281

7. Transparencias y puesta en común de información 281

Resumen

Considerando la importancia de los recursos hídricos para la Unión Europea es fundamental contar con un marco regulatorio que contemple las diversas alternativas para la mejor gestión del agua, este es el caso de la reutilización del agua. Las medidas que pueden tomarse para reutilizar o aprovechar mejor los recursos hídricos de la UE nos permiten afrontar los problemas de escasez de agua y deterioro de su calidad. En particular, el cambio climático, las pautas meteorológicas impredecibles y las sequías están contribuyendo significativamente a la presión sobre la disponibilidad de agua dulce, derivadas del desarrollo urbano y la agricultura.

La capacidad de la UE ante las presiones crecientes sobre los recursos hídricos tiene capacidad de mejora mediante una mayor reutilización de las aguas depuradas, limitando la extracción de las masas de agua superficiales y de las masas de aguas subterráneas, reduciendo el impacto de los vertidos de aguas depuradas en las masas de agua y fomentando el ahorro de agua a través de los usos múltiples de las aguas residuales urbanas, garantizando al mismo tiempo un nivel elevado de protección del medio ambiente.

En este contexto, el capítulo presenta el marco regulatorio y cómo se abordan los principales elementos**, el ámbito o alcance, la calidad de las aguas regeneradas, la gestión del riesgo y las obligaciones legales para los operadores**.

1. Ámbito de aplicación y alcance

La regulación del agua regenerada para uso agrícola, es decir, la procedente de la reutilización es fundamental para la optimización de un recurso limitado como es el agua. En la Unión Europea la regulación básica se concreta en el **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**. La UE ha definido un escenario legislativo que contribuye a facilitar la implantación de la reutilización del agua creando un entorno adecuado para que los distintos Estados miembros puedan optimizar el consumo de agua.

Era necesario regular en esta materia, no solo por tratarse de un recurso crítico como es agua, sino debido a que es muy importante que dispongamos de legislación armonizada para que no se genere disparidad legislativa en los países de la UE y pudieran darse criterios heterogéneos en la reutilización del agua.

El marco regulatorio no se ciñe única y exclusivamente al proceso de tratamiento del agua para su posterior reutilización, se regulan también **otros aspectos que son fundamentales para garantizar la seguridad en el empleo que se haga del agua de tal forma que dispongamos de un enfoque holístico**. Al reutilizar el agua se deben valorar los posibles riesgos para la salud humana y el medio ambiente y su incidencia en un planteamiento global. En este sentido los operadores de aguas regeneradas y las autoridades competentes habrán de considerar entre otras las siguientes disposiciones legales:

- Directiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 relativa a la **calidad de las aguas destinadas al consumo humano**.
- Reglamento (CE) nº 178/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 28 de enero de 2002, por el que se establecen los principios y los requisitos generales de la legislación alimentaria, se crea la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria y se fijan **procedimientos relativos a la seguridad alimentaria.**
- Reglamento (CE) nº 852/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativo a la **higiene de los productos alimenticios.**
- Reglamento (CE) nº 183/2005 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de enero de 2005, por el que se fijan **requisitos en materia de higiene de los piensos**.
- Reglamento (UE) nº 142/2011 de la Comisión, de 25 de febrero de 2011, por el que se establecen las disposiciones de aplicación del Reglamento (CE) nº 1069/2009 del Parlamento Europeo y del Consejo por el que se establecen las **normas sanitarias aplicables a los subproductos animales y los productos derivados no destinados al consumo humano.**
- Reglamento (CE) nº 396/2005 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de febrero de 2005 relativo a los **límites máximos de residuos de plaguicidas** en alimentos y piensos de origen vegetal y animal.
- Reglamento (CE) nº 2073/2005 de la Comisión, de 15 de noviembre de 2005, relativo a los **criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticios**.
- Reglamento (UE) 2023/915 de la Comisión de 25 de abril de 2023 relativo a **los límites máximos de determinados contaminantes en los alimentos.**

Normalmente la legislación nacional está inspirada en las líneas o directrices que vienen de Bruselas, en el caso de la reutilización del agua y tratando el marco legislativo surge una

excepción, se trata de la legislación española para la reutilización de las aguas depuradas establecida en el **Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas**. Podemos decir que la legislación nacional, en cierto modo, ha inspirado el desarrollo del propio Reglamento (UE) 2020/741, tal y como se pone de manifiesto en el preámbulo del **proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el reglamento de reutilización de las aguas (27 de noviembre de 2023):**

"Esta normativa española ha tenido su reflejo en la normativa europea, de forma que, parte de sus objetivos e incluso de su articulado han sido recogidos en el Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo del 25 de mayo de 2020, relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua en usos agrícolas. Asimismo, este Reglamento se ha complementado mediante la Comunicación de la Comisión las Directrices para apoyar la aplicación del Reglamento 2020/741 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua (2022/C 298/01)".

Por lo tanto, conviene tener presente lo establecido en el Real Decreto 1620/2007 y la futura legislación que lo derogará, aunque en menor medida que el propio Reglamento (UE) 2020/741 en tanto que prohíbe el uso de aguas regeneradas para la industria alimentaria salvo supuestos muy concretos asociados al uso de las aguas regeneradas en el ámbito agrícola.

2. Alcance de la reutilización de aguas regulado, ¿dónde puede emplearse en la actividad agroalimentaria?

El Reglamento (UE) 2020/741 se centra en el establecimiento de los **requisitos mínimos de calidad y control del agua y disposiciones sobre gestión del riesgo, para la utilización segura de las aguas regeneradas** en el contexto de una gestión integrada del agua. El cumplimiento de los criterios establecidos garantizará que **las aguas regeneradas sean seguras para el riego agrícola,** y de esta forma asegurar un alto nivel de **protección del medio ambiente, de la salud humana y la sanidad animal, promover la economía circular, luchar contra el cambio climático y contribuir a los ODS 2030, en particular los números 6, 12 y 13.**

En el marco regulatorio de las aguas regeneradas es fundamental prestar especial atención a una serie de conceptos clave:

- **«aguas residuales urbanas»:** las aguas residuales urbanas tal como se definen en el artículo 2, punto 1, de la Directiva 91/271/CEE;
- **«aguas regeneradas»:** las aguas residuales urbanas que han sido tratadas en cumplimiento de los requisitos establecidos en la Directiva 91/271/CEE y que resultan de un tratamiento posterior en una estación regeneradora de aguas, de conformidad con la sección 2 del anexo I del presente Reglamento;
- **«sistema de reutilización del agua»:** la infraestructura y otros elementos técnicos necesarios para producir, suministrar y utilizar aguas regeneradas; comprende todos los elementos desde el punto de entrada de la estación depuradora de aguas residuales urbanas hasta el punto en que las aguas regeneradas se utilizan para el riego agrícola, con inclusión, en su caso, de la infraestructura de distribución y almacenamiento.

- **«usuario final»:** una persona física o jurídica, ya sea entidad pública o privada, que utiliza las aguas regeneradas para el riego agrícola;

El objetivo de la legislación es que las medidas necesarias para la reutilización de las aguas se apliquen en toda la UE. No obstante, queda abierta la posibilidad para que cualquiera de los 27 Estados miembros pueda limitar la posibilidad de reutilizar aguas para riego agrícola en una o varias sus demarcaciones hidrográficas, siempre y cuando se atienda a criterios relativos a:

- las condiciones geográficas y climáticas de la demarcación o de partes de esta;
- las presiones sobre otros recursos hídricos y el estado en que estos se encuentran;
- las presiones sobre las masas de aguas superficiales en las que se vierten las aguas urbanas depuradas y el estado de aquellas;
- los costes medioambientales y del recurso del agua regenerada y de los otros recursos hídricos.

Las citadas excepciones, estarán justificadas objetivamente y serán revisadas para considerar las circunstancias climáticas, las estrategias nacionales de adaptación al cambio climático y los planes hidrológicos.

Con el alcance previsto en la regulación se confirma que la reutilización de las aguas es una fuente alternativa de suministro de agua que contribuye al equilibrio de los recursos hídricos disponibles y permite que otros recursos hídricos puedan destinarse a otras aplicaciones más exigentes, como es el caso del abastecimiento de agua potable para la población. Se trata de lograr un máximo aprovechamiento de todos los recursos para potenciar la gestión integrada del agua afrontando todos los retos, sequía, escasez de agua, economía circular y cambio climático.

El futuro reglamento de reutilización del agua no sólo deroga el Real Decreto 1620/2007, desarrolla el capítulo III del título V, «De la reutilización de las aguas», de la Ley de Aguas (Real Decreto Legislativo 1/2001), sino que completa el Reglamento (UE) 2020/741, respecto de la reutilización de aguas destinadas al riego agrícola.

3. Gestión del riesgo

La consecución de una adecuada reutilización de las aguas hace necesaria la gestión del riesgo, estamos ante una actividad que tiene un riesgo implícito en función de la materia prima empleada (aguas residuales urbanas). El legislador ha determinado las **medidas para la gestión del riesgo mediante un enfoque proactivo** al identificar los riesgos para la producción de aguas regeneradas, valorando en cada caso la calidad específica del posible uso al que se destine. La responsabilidad del **plan de gestión del riesgo recae en el operador de la estación regeneradora de aguas, otras partes responsables y los usuarios finales**, según corresponda en cada caso.

Los **elementos clave** que han de ser considerados en los **planes de gestión del riesgo** del agua regenerada son:

- **Descripción del sistema de reutilización del agua en todo su conjunto**, teniendo en cuenta todos los eslabones de la cadena de aprovechamiento y uso del agua.

- **Identificación de todas las partes que intervienen en el sistema** de reutilización del agua y descripción clara de sus funciones y responsabilidades.
- **Identificación de los potenciales agentes peligrosos,** en particular la presencia de contaminantes y patógenos.
- **Identificación de los entornos y los grupos de exposición**, teniendo en cuenta factores ambientales específicos, tales como la hidrogeología, la topología, el tipo de suelo y la ecología a escala local, y factores relacionados con el tipo de cultivos y las prácticas agrícolas y de riego.
- **Evaluación de los riesgos para el medio ambiente y para la salud humana y la sanidad animal,** teniendo en cuenta la naturaleza de los posibles agentes peligrosos identificados.

Estos elementos se plantean en el artículo 5 y el Anexo II del Reglamento (UE) 2020/741 y han sido abordados en mayor medida a través del documento de la Comisión Europea ***"Directrices para apoyar la aplicación del Reglamento 2020/741 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua"*** en especial en la sección dedicada a los aspectos técnicos. Se incorpora el esquema con los elementos clave de gestión de riesgo publicado en el citado documento:

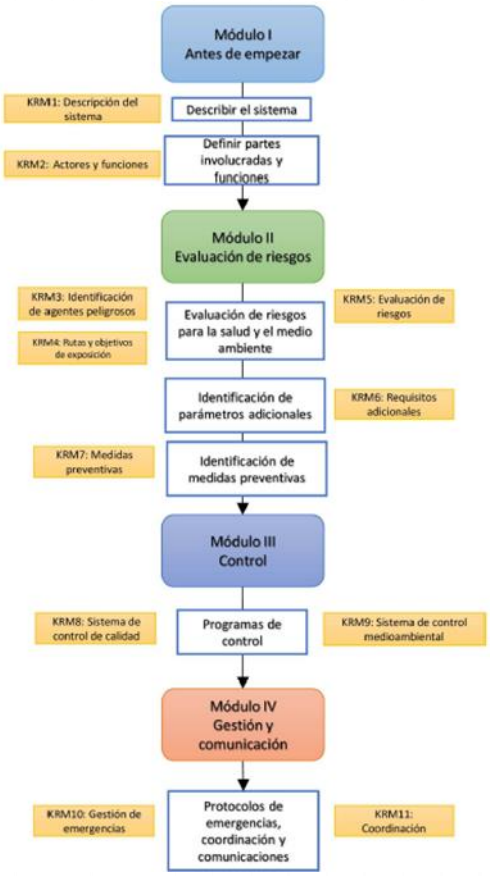


Figura 1. Elementos clave de gestión del riesgo (KMR) para la reutilización del agua organizados en cuatro módulos para contribuir a la formulación de un plan de gestión del riesgo

Por último, debe tenerse en cuenta que los **planes de gestión del riesgo del agua regenerada** se basan en lo establecido en la legislación vigente y además en las orientaciones y normas internacionales existentes, tales como las **Directrices ISO 20426:2018** sobre evaluación y gestión del riesgo para la salud derivados de la reutilización de agua no potable e **ISO 16075:2015** sobre

uso de aguas depuradas para proyectos de riego o las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

4. Obligaciones legales de los operadores

Al referirnos a las **obligaciones legales de los operadores** lo hacemos a todas aquellas **partes responsables**, tal y como han sido definidas en el Reglamento (UE) 2020/741 "alguien que realiza una función o una actividad como parte en el sistema de reutilización de aguas, incluido el operador de la estación regeneradora de aguas, el operador de la estación depuradora de aguas residuales urbanas cuando no se trate del operador de la estación regeneradora de aguas, la autoridad pertinente que no sea la autoridad competente designada, el operador de la distribución de aguas regeneradas, o el operador del almacenamiento de aguas regeneradas". Por tanto, nos referimos a:

- Operador de la estación regeneradora de aguas.
- Operador de la estación depuradora de aguas residuales urbanas cuando no se trate del operador de la estación regeneradora de aguas.
- Autoridades pertinentes que no sean la autoridad competente designada.
- Operador de la distribución o del almacenamiento de aguas regeneradas.

En cualquier caso, la producción y el suministro de aguas regeneradas para el riego agrícola están condicionadas a la **previa obtención de un permiso que será concedido por parte de las autoridades competentes de cada Estado miembro**. El permiso estará basado en el plan de gestión del riesgo del agua regenerada y especificará, entre otros elementos, lo siguiente:

- la **clase o clases de calidad de las aguas regeneradas y el uso agrícola para el que**, de conformidad con el anexo I, **se permiten** las aguas regeneradas, el lugar de utilización, las estaciones regeneradoras de aguas y el volumen anual estimado de aguas regeneradas que se haya de producir;
- las **condiciones relativas a los requisitos mínimos de calidad y control del agua** previstos en la sección 2 del anexo I;
- toda condición relativa a **los requisitos adicionales que ha de cumplir el operador de la estación regeneradora de aguas**, prevista en el plan de gestión del riesgo del agua regenerada;
- cualquier otra **condición necesaria para eliminar todo riesgo inaceptable para el medio ambiente y para la salud humana y la sanidad animal** de modo que cualquier riesgo sea de un nivel aceptable;
- el **período de validez** del permiso;
- el **punto de cumplimiento**.

5. Obligaciones relativas al permiso

- La producción y el suministro de aguas regeneradas destinadas al riego agrícola exigen un permiso.

- Las partes responsables deben presentar una solicitud a la autoridad nacional competente.
- El permiso precisará las obligaciones del operador de la estación regeneradora de aguas y, en su caso, de cualquier otra parte que participe en el sistema de reutilización del agua, y estará basado en el plan de gestión del riesgo. El permiso especificará una serie de elementos, entre otros:
    - **la clase o clases de calidad de las aguas regeneradas** y el uso agrícola para el que se permiten las aguas regeneradas, el lugar de utilización, las estaciones regeneradoras de aguas y el volumen anual estimado de aguas regeneradas que se haya de producir;
    - las condiciones relativas a los requisitos mínimos de calidad y control del agua;
    - toda condición relativa a los requisitos adicionales que ha de cumplir el operador de la estación regeneradora de aguas, prevista en el plan de gestión del riesgo del agua regenerada;
    - cualquier otra condición necesaria a fin de eliminar todo **riesgo inaceptable** para el medio ambiente, la salud humana y la sanidad animal;
    - el período de validez del permiso;
    - el punto de cumplimiento.
- Los permisos se revisarán periódicamente y se actualizarán de ser necesario, al menos cuando se produzcan cambios significativos en los procesos de tratamiento o en las condiciones de la zona.

6. Comprobaciones del cumplimiento

- La autoridad nacional pertinente debe comprobar el cumplimiento de las condiciones establecidas en el permiso. Para ello deben:
    - efectuar controles in situ;
    - datos de seguimiento obtenidos, en particular, con arreglo a lo dispuesto en el presente Reglamento;
    - cualquier otro medio adecuado.
- El Reglamento también establece las medidas que deben adoptarse en caso de incumplimiento.
- La autoridad nacional pertinente también debe comprobar periódicamente el cumplimiento de los planes de gestión del riesgo.

7. Transparencias y puesta en común de información

- Se deben establecer puntos de contacto nacionales para facilitar la coordinación transfronteriza en caso necesario.
- Para garantizar la transparencia, el Reglamento también establece normas sobre:
    - concienciación;
    - información que ha de ponerse a disposición del público;
    - información sobre el seguimiento de la ejecución.

- La Comisión llevará a cabo una evaluación del Reglamento el 26 de junio de 2028.

Por último, todo lo dicho en este capítulo queda supeditado a la evolución de la legislación nacional y comunitaria, teniendo en cuenta lo que indica el Reglamento (UE) 2020/741 en su Anexo I:

"Sin perjuicio de otras normas de Derecho de la Unión aplicables en los ámbitos del medio ambiente y de la salud, los Estados miembros podrán utilizar agua regenerada para usos adicionales tales como: — la reutilización del agua en la industria".

Bibliografía

Comisión Europea. (2020). Comunicación de la Comisión Europea: Directrices para apoyar la aplicación del 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. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=celex%3A32020R0741

Ferrer, J. M. (2020). Economía Circular y la reutilización del agua para el riego, nuevo escenario regulatorio. AINIA. https://www.ainia.es/ainia-news/economia-circular-reutilizacion-agua-riego-nuevo-escenario-regulatorio/

Gobierno de España. (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. Boletín Oficial del Estado, núm. 299, pp. 49784-49808

Gobierno de España. (2023). Proyecto de Real Decreto por el que se aprueba el reglamento de reutilización de las aguas. https://www.miteco.gob.es/es/agua/participacion-publica/proyecto-rd-reglamento-reutilizacion-aguas.html

Ministerio Para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO). (s.f.). https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/concesiones-y-autorizaciones/reutilizacion-aguas-depuradas/documentacion.html

Moreno, J. M.; Ortiz, M. I. L.; Giménez, A. M. (2023). La economía circular y el sector del agua en España: análisis jurídico-económico. Tirant lo Blanch. ISBN:9788411477895

Unión Europea. (2020). 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. Diario Oficial de la Unión Europea, L 177/1. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A32020R0741

Water reuse. (2024). Environment. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-reuse_en?prefLang=es&etrans=es

3.3. Desalación de agua marina y su aplicación al riego

Victoriano Martínez Álvarez, Belén Gallego Elvira y José Francisco Maestre Valero*

Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT)

* *Josef.maestre@upct.es*

Índice

1. Desalación y desalobración 284
2. Situación actual de la producción de agua desalada para riego 287
   2.1. Perspectiva global 287
   2.2. Situación en España 288
3. Fundamentos tecnológicos de la desalación 289
   3.1. Descripción general de las instalaciones desaladoras por ósmosis inversa 290
   3.2. Captación 291
   3.3. Pretratamientos 291
   3.4. Ósmosis inversa 292
   3.5. Post-tratamientos 294
4. Principales características del agua marina desalada 296
5. Consideraciones agronómicas del riego con agua marina desalada 299
   5.1. Efectos de la escasez de nutrientes en la fertilización 300
   5.2. Riesgo de fitotoxicidad por boro 302
   5.3. Riesgo de alcalinización del suelo 305
6. Principales aspectos de la sostenibilidad de la desalación como fuente de agua para riego 306
   6.1. Emisión de gases de efecto invernadero 307
   6.2. Tratamiento y gestión de salmueras 309

Resumen

El cambio climático está intensificando la escasez de agua en numerosas regiones, afectando principalmente a la agricultura de regadío. En este contexto, la desalación de agua marina es una estrategia adaptativa que esta proporcionado un suministro creciente a la agricultura durante más de una década en España e Israel, reemplazando a unos recursos convencionales cada vez más escasos. Este capítulo comienza presentando la situación actual de la producción de agua marina desalada para riego, tanto a nivel global como en el sureste español. A continuación, se revisan los fundamentos tecnológicos de la desalación, centrándose en la

descripción de las instalaciones desaladoras por ósmosis inversa, que son las que se han impuesto por su mayor eficiencia energética. Seguidamente se analizan las singularidades del agua marina desalada en relación al resto de recursos hídricos, analizando tanto sus características técnicas como agronómicas. Los efectos agronómicos de la sustitución de recursos hídricos convencionales por agua marina desalada preocupan especialmente a los agricultores, por lo que se analizan los más destacables, como el efecto de la escasez de nutrientes en la fertilización, el riesgo de fitotoxicidad por boro, y el riesgo de alcalinización del suelo. Finalmente, se presentan las principales cuestiones a considerar sobre la sostenibilidad de la desalación como fuente de agua para riego, destacando la emisión de gases de efecto invernadero asociada a su producción y distribución, y las alternativas de tratamiento y manejo de las salmueras resultantes. Nuestro análisis evidencia que la desalación se está convirtiendo en un soporte fundamental para la resiliencia del regadío y la seguridad alimentaria de regiones con déficit hídrico, siendo previsible su futura extensión a otras regiones deficitarias con producciones agrícolas de alto valor añadido. Los resultados expuestos ponen de manifiesto que, además de consideraciones económicas o medioambientales, existen aspectos agronómicos suficientemente relevantes a tener en cuenta a la hora de incorporar el agua desalada al riego.

1. Desalación y desalobración

La Tierra se caracteriza por la abundancia de agua, que cubre dos tercios de la superficie del planeta. Sin embargo, cerca del 40% de la población mundial sufre escasez de agua, circunstancia que conlleva graves consecuencias sociales, económicas y ambientales, como la pobreza, el hambre, las enfermedades, los conflictos, la pérdida de biodiversidad y la degradación de los ecosistemas (UNESCO, 2023). Este escenario contradictorio se debe a que el 97,5% del agua de la tierra se encuentra en los mares y océanos, caracterizándose por una salinidad elevada, por lo que su uso en el abastecimiento doméstico, agrícola o industrial no es viable a mes que se someta a tratamientos de desalación y acondicionamiento. El agua restante (2,5%) es agua dulce, pero dos tercios de la misma se encuentra inmovilizada en las masas de hielo permanentes. Por tanto, el agua dulce disponible en la Tierra es de $12{,}8 \cdot 10^6$ km^3 aproximadamente, lo que representa menos del 1% del total. Esta se encuentra principalmente en los suelos y la corteza terrestre, siendo el agua superficial y atmosférica solo de 150.000 km^3, es decir, el 0,01% del agua total que hay en la tierra. Por tanto, el agua dulce disponible es muy limitada, pero existen enormes reservas de agua salada que, mediante procesos que eliminen su salinidad y acondicionen su composición química, podría ser utilizada para satisfacer cualquier tipo de demanda, mitigando los problemas de escasez de agua, estrategia que resulta especialmente interesante en regiones costeras.

En general, se entiende por desalinización el proceso o conjunto de procesos destinados a eliminar o reducir la salinidad del agua hasta niveles que la hagan apta para el uso considerado. Cuando se trata de agua de mar, el término técnico más preciso es “desalinización”, ya que lo que se elimina del agua es su salinidad, aunque el término que se ha extendido y generalizado en todos los ámbitos es “desalación”, palabra que originalmente sólo debería emplearse para referirse al proceso donde se elimina la sal, como en los procesos de desalación de carnes y

pescados conservadas con dicho producto. Cuando las aguas con elevada salinidad son de origen continental, como ocurre frecuentemente en acuíferos costeros y drenajes agrícolas, nos referimos a ellas como aguas salobres, y el proceso para la reducción de su salinidad se denomina "desalobración". Del mismo modo, diferenciamos entre "plantas desaladoras o desalinizadoras" y "plantas desalobradoras" en función del origen del agua, aunque los procesos que rigen su funcionamiento sean esencialmente los mismos.

Actualmente, las tecnologías de desalación en el ámbito del regadío se aplican a aguas con los siguientes orígenes:

- Agua de mar. Caracterizada por una salinidad elevada y uniforme, así como una disponibilidad prácticamente infinita.
- Aguas salobres, principalmente subterráneas, cuya salinidad es de origen geológico o resultado de la intrusión marina y/o actividades humanas. Su salinidad y composición puede ser muy variable, estando su disponibilidad generalmente asociada a las recargas naturales del sistema hidrológico al que pertenecen.
- Aguas depuradas salobres. Las estaciones depuradoras de aguas residuales situadas en zonas litorales suelen producir efluentes con una elevada salinidad, ya que se ven afectadas por filtraciones de agua marina o salobre en las redes de saneamiento, por lo que deben ser desaladas si se pretende su reutilización en el regadío.

Los procesos de desalación de agua marina y de desalobración son esencialmente el mismo. Según se muestra en la Figura 1, se parte de un flujo de agua con un elevado contenido de sales, que se denomina agua bruta, al que se le añaden una serie de aditivos. Esta agua bruta se somete a un proceso de separación, para el que existen distintas tecnologías, y del que resultan dos flujos distintos: el agua producto o agua desalada, sin apenas sales, y la salmuera o rechazo, donde quedan concentradas la mayor parte de las sales y los aditivos. Las tecnologías de separación se caracterizan con diferentes parámetros, entre los que se destaca el "factor de conversión", que es el porcentaje de agua producto respecto al agua bruta, y el "factor de rechazo" o "corte de sales", que se refiere al porcentaje de un ion específico que es eliminado en el proceso.

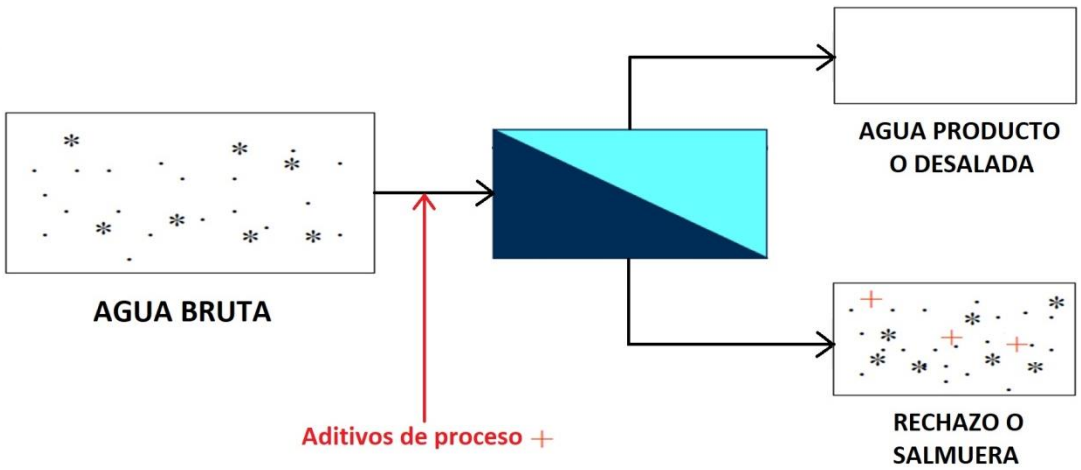


Figura 1. Esquema de los flujos implicados en los procesos de desalación y desalobración

Aunque existen distintas tecnologías para la desalación, como se detalla en el Epígrafe 3, la ósmosis inversa se ha impuesto como la más eficiente entre las actualmente operativas a gran escala. Las plantas desaladoras y desalobradoras por ósmosis inversa emplean los mismos procesos y siguen el mismo esquema productivo, pero presentan notables diferencias técnicas como consecuencia de las diferentes características del agua que tratan. En las plantas desaladoras, el agua de mar presenta una concentración de sales de 38-40 g/L, con una predominancia de los iones Cl^- y Na^+, mientras el agua salobre suele presentar una concentración de sales sensiblemente inferior (2-10 g/L), una composición más variada, y caudales limitados. Como consecuencia, las principales diferencias entre la producción de Agua Marina Desalada (AMD) y agua desalobrada son las siguientes:

- Los caudales tratados y el tamaño de las plantas, que generalmente son de varios órdenes de magnitud inferiores en las desalobradoras. Como se observa en la Figura 2, las plantas desalobradoras suelen implementarse en pozos particulares a escala de parcela, mientras las plantas desaladoras suelen ser colectivas, se localizan en la costa, y suministran una o varias comunidades de regantes simultáneamente.
- La presión de trabajo es mucho más baja en la desalobración (10-20 bar) que en la desalación (60-70 bar), circunstancia que condiciona tanto los materiales de los conductos como del equipamiento en las instalaciones de ósmosis inversa.
- El factor de conversión en la desalación de agua marina (40-50%) es inferior al de la desalobración (75-90%), lo que resulta en salmueras de caudales y características muy diferentes, cuyo tratamiento y gestión requiere estrategias distintas (ver Epígrafe 6.2).
- El consumo energético es entre 3 y 5 veces superior en la producción de AMD, resultando en unos costes de explotación y un coste final del agua producto notablemente superior al de las plantas desalobradoras.

Figura 2. Diferencia de escala entre una planta desalobradora (izquierda) y una planta desaladora de agua marina (derecha), ambas para suministro agrícola

La desalación y desalobración han experimentado un gran desarrollo en las últimas décadas, tanto en el número de plantas instaladas como en su eficiencia, llegando incluso a suponer un suministro esencial para la agricultura de regadío de algunas regiones. En este capítulo se revisan la situación actual de la producción de agua desalada para riego, los fundamentos tecnológicos de la desalación de aguas para riego, las principales características del AMD, y las consideraciones agronómicas más relevantes para su aplicación al riego. El análisis se fundamenta en la experiencia de los autores en la temática tratada, tras una década de trabajos de investigación sobre el riego con AMD en el sureste español, por lo que la información aportada se enmarca principalmente en dicho ámbito agroclimático.

2. Situación actual de la producción de agua desalada para riego

2.1. Perspectiva global

Según la Asociación Internacional de Desalación (IDA, 2020), a nivel global existen actualmente más de 18.000 plantas desaladoras y desalobradoras operativas en 177 países, que en su conjunto producen en torno a 60 hm^3/día de AMD, y 40 hm^3/día de agua desalobrada (Figura 3). Del total, el 60% son plantas desaladoras de agua marina y el 71% emplean la técnica de desalación por ósmosis inversa (OI). Los países con mayor capacidad instalada son Arabia Saudí y Estados Unidos, ocupando España la quinta posición global y la primera en Europa. Como se observa en la Figura 3, hasta 1985 predominaron las plantas basadas en técnicas de destilación, localizadas principalmente en los países ricos en petróleo de Oriente Medio. A partir de 1985 se generalizó el empleo de la tecnología de OI. En el año 2000 los volúmenes de agua desalada procedentes de técnicas de destilación y de membrana se igualaron, y desde entonces la técnica de OI se ha impuesto claramente, siendo la que se ha generalizado en la práctica totalidad de nuevas instalaciones.

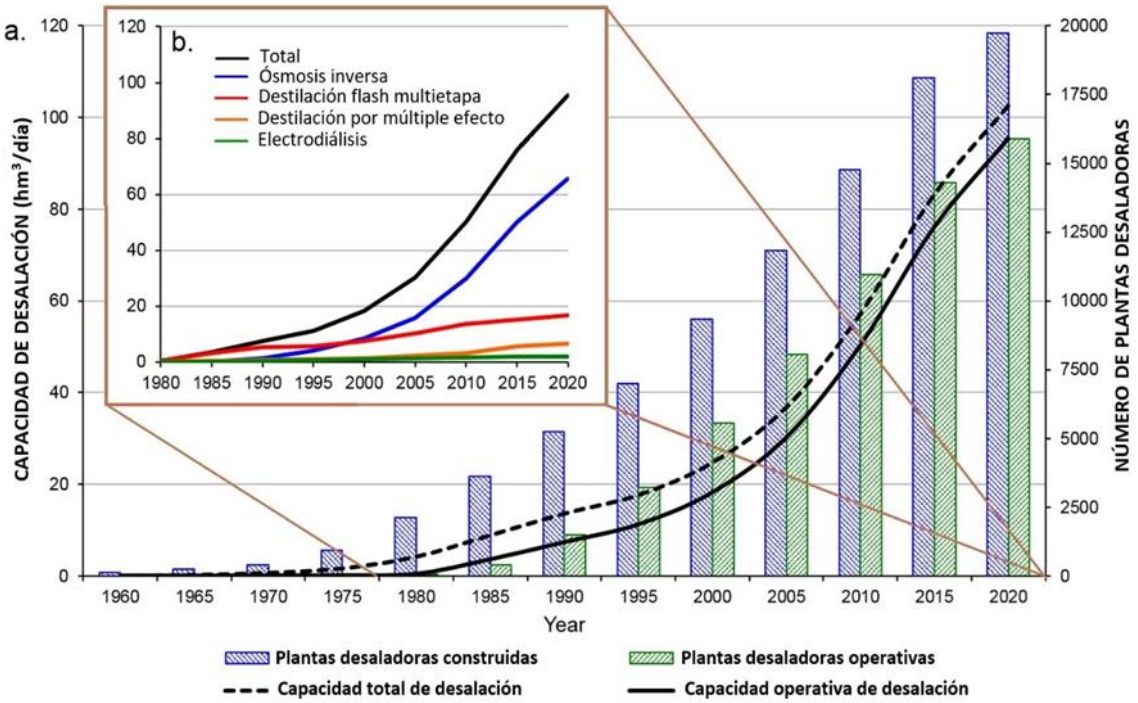


Figura 3. Evolución del número de plantas desaladoras y de su capacidad total en el mundo (a), junto con la tecnología aplicada en el proceso de desalación (b) (Jones *et al.,* 2019)

La mayor parte de esta producción se destina al uso doméstico (62,3%) e industrial (30,2%), existiendo instalaciones desaladoras en prácticamente todo el mundo con dicha finalidad (IDA, 2020). El suministro masivo de AMD a la agricultura de regadío sólo se realiza actualmente en dos regiones caracterizadas por una elevada aridez y una agricultura de muy alto valor añadido, como son el sureste de España (Martínez-Álvarez *et al*., 2017) e Israel (Russo *et al.*, 2019), donde se aplican cerca de 200 hm^3/año en cada una de ellas, así como en regiones insulares sin presencia de otras fuentes de agua dulce (Monterrey-Viña *et al.,* 2020). El uso agrícola del AMD representa aproximadamente el 3% de la capacidad instalada a escala global, pero es previsible que su relevancia se incremente a medio plazo dado que existen muchas otras regiones que están considerando se incorporación al regadío, como son Marruecos (Hirich *et al*., 2015), Arabia

Saudí (Multsch *et al.,* 2017), Chile (Herrera-León *et al.,* 2019), California (Qin y Horvath, 2020), Túnez (Daghari *et al.,* 2021) o México (Hipolito-Valencia *et al.,* 2021).

2.2. Situación en España

El origen de la desalación para uso agrícola en España se produce en los años 90, cuando se instalan más de 300 plantas privadas de tamaño pequeño y medio (500 – 5.000 m^3/día) en las provincias de Alicante, Murcia y Almería, principalmente desalobradoras de agua subterránea en acuíferos costeros. En 2004 el Gobierno de España aprobó el Programa AGUA (Actuaciones para la Gestión y la Utilización del Agua), propuesto por el Ministerio de Medio Ambiente para dotar de recursos hídricos el abastecimiento y el regadío a las cuencas mediterráneas. El Programa AGUA supuso la apuesta por la desalación como estrategia clave para solucionar los problemas derivados del déficit de recursos hídricos existente en la costa mediterránea española, programando actuaciones capaces de producir hasta 500 hm^3/año. En concreto, se planificó la puesta en marcha y construcción de 27 plantas desaladoras, de las que se han ejecutado la mayor parte.

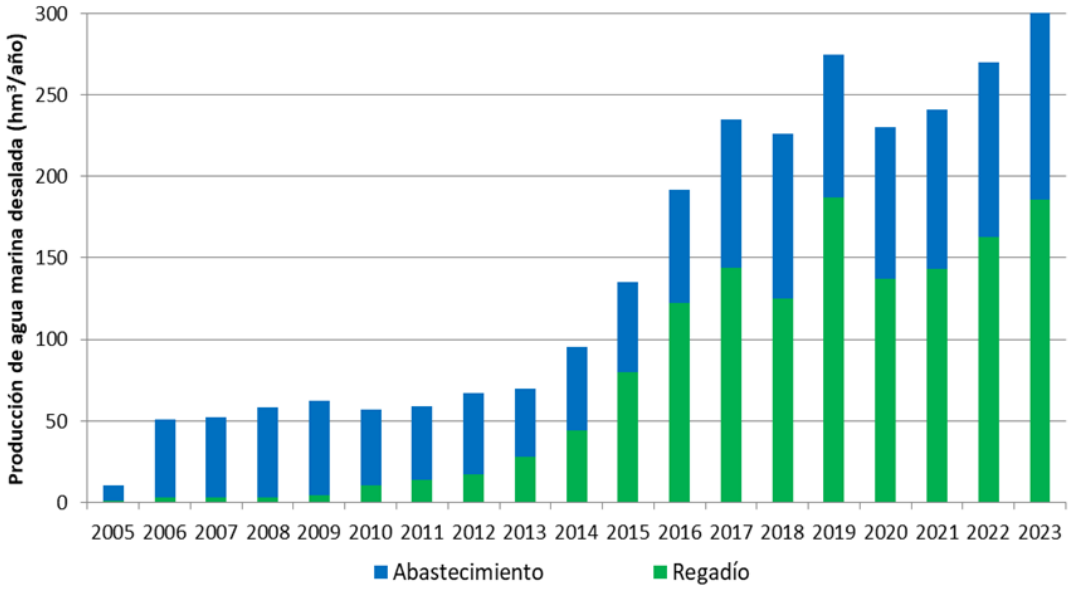


Figura 4. Evolución del suministro de AMD para uso doméstico y para regadío en las plantas gestionadas por Acuamed en el sureste español. Fuente: Acuamed (2023)

Como resultado tanto del Programa AGUA como de la iniciativa privada, el porcentaje de AMD que se destina al regadío en España es del 22%. Actualmente, muchas comunidades de regantes y empresas agrícolas ubicadas en el sureste español cuentan con AMD y agua desalobrada como parte de sus recursos hídricos, y las gestionan conjuntamente con el resto de los recursos disponibles: aguas superficiales, recursos externos trasvasados, aguas subterráneas y agua regenerada, consiguiendo de esta manera compensar las virtudes e inconvenientes de cada uno de ellos (coste, salinidad, composición química, etc.). Concretamente, abastecen al regadío del sureste español nueve Estaciones Desaladoras de Agua Marina (EDAMs), localizadas en las provincias de Alicante, Murcia y Almería. Las plantas de Torrevieja, Valdelentisco, Águilas, Carboneras y Campo de Dalías son de propiedad pública y están gestionadas por la empresa pública Acuamed, mientras que las plantas de Escombreras, Mazarrón, La Marina y CR Águilas son de propiedad privada y, exceptuando la de Escombreras, pertenecen a distintas

comunidades de regantes. Centrándonos en las plantas desaladoras públicas, la producción de agua desalada para riego en el año 2023 fue de 186 hm^3 de un total de 301 hm^3 de producción, es decir, el suministro agrícola representa ya el 62% (Acuamed, 2023). La Figura 4 muestra la evolución del uso agrícola del AMD desde el año 2005, que fue cuando entró en producción la planta de Carboneras, hasta el año 2023, donde se observa claramente como el suministro agrícola ha ido ganando importancia y se ha consolidado como el principal uso de este nuevo recurso hídrico.

3. Fundamentos tecnológicos de la desalación

Las tecnologías de desalación actualmente operativas se clasifican en métodos térmicos y métodos de membrana. Los métodos térmicos, también denominados de destilación o evaporación, realizan la separación del agua y la sal mediante la evaporación del agua por aporte de energía, y su posterior condensación por enfriamiento. La industrialización de estos procesos ha dado lugar a distintas tecnologías constituidas por varias etapas y recirculaciones de distintas corrientes que pretenden optimizar el aprovechamiento del calor aportado, destacando las tecnologías de destilación flash multietapa, destilación por múltiple efecto y compresión de vapor (Curto *et al.,* 2021). Estas tecnologías se han empleado en países donde el coste de la energía es muy reducido, como los países del Golfo Pérsico, pero cada vez se utilizan menos como consecuencia de su falta de competitividad energética frente a las técnicas de membrana (Figura 3), por lo que no sé les prestará más atención en este capítulo.

Los métodos de membranas consisten en un conjunto de operaciones de separación de uno o más componentes de una fase líquida utilizando una membrana con permeabilidad selectiva, conocidas generalmente como membranas semipermeables. En el caso de la desalación, los componentes que se separan son los iones disueltos en el agua bruta, generando como resultado (Figura 1) una corriente con menor salinidad que el agua tratada (agua producto o permeado) y otra corriente con mayor salinidad que el agua tratada (salmuera o rechazo). Entre las técnicas de desalación por membranas, las tecnologías operativas son la electrodiálisis reversible (EDR), la OIy la nanofiltración (Curto *et al.,* 2021). Además, existe un numeroso grupo de técnicas innovadoras de desalación en estado experimental, o desarrolladas en pilotos a pequeña escala, como la congelación, el intercambio iónico, la formación de hidratos, la pervaporación, las células microbianas de desalación, etc. Estas técnicas actualmente no se encuentran operativas a la escala de trabajo requerida para el suministro agrícola.

La EDR usa corriente eléctrica continua para separar las sales en un flujo de agua bruta, que se desplazan hacia los electrodos, según su carga eléctrica. En su tránsito hacia los electrodos, los iones positivos o negativos atraviesan membranas selectivas cuya configuración genera cámaras con sales (salmuera) y cámaras sin sales (permeado). Cada etapa de EDR elimina aproximadamente el 50-60% de sales, por lo que sólo es compatible con aguas salobres de salinidad moderada, donde en una o dos etapas se obtiene la salinidad deseada en el agua producto. La OI utiliza el principio de ósmosis para eliminar la sal y otras impurezas, haciendo pasar el agua bruta a través de una serie de membranas semipermeables en el sentido contrario de la ósmosis directa o natural, para lo cual debe aplicarse una presión creciente con la salinidad del agua. Se trata, con notable diferencia, de la técnica más empleada en la actualidad ya que,

como consecuencia de la continua mejora tecnológica en los distintos procesos que comprende, es la que presenta un menor consumo específico de energía. La nanofiltración es un proceso prácticamente idéntico a la OI, donde el tipo de membranas empleado es efectivo en la separación de iones divalentes o de gran tamaño (SO_4^{2-}, Ca^{2+}, Mg^{2+},...), pero deja pasar los iones monovalentes predominantes en el agua de mar y en las aguas salobres (Cl^-, Na^+), por lo que su aplicación sólo es apta para reducir la salinidad producida por estos iones en aplicaciones como la reducción de la dureza del agua.

3.1. Descripción general de las instalaciones desaladoras por ósmosis inversa

Las plantas que emplean la tecnología de OI producen agua osmotizada a partir de agua de mar o agua salobre, que puede ser a su vez convertida en agua potable o apta para otros usos tras someterse a los post-tratamientos correspondientes. No existen diferencias significativas ente el diagrama de proceso de una EDAM y de una estación desalobradora, diferenciándose principalmente en las instalaciones de captación del agua bruta, los requerimientos del post-tratamiento y las magnitudes características en los parámetros de operación de la OI, como ya se indicó en el Epígrafe 1. La Figura 5 muestra el diagrama de flujo característico de este tipo de instalaciones.

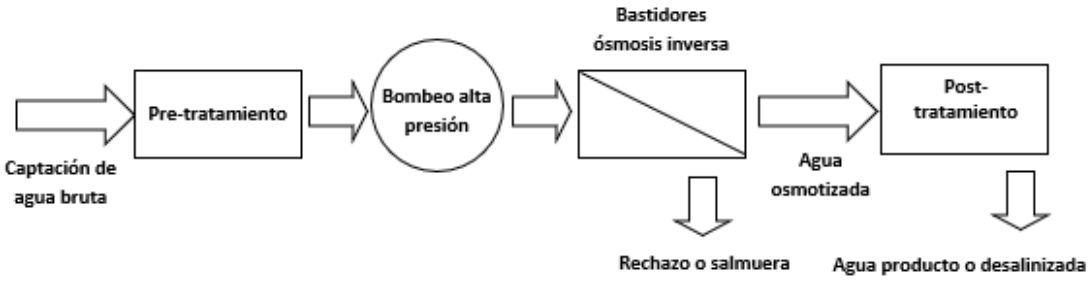


Figura 5. Diagrama de flujo de los procesos de desalinización por ósmosis inversa

Tanto las EDAMs como las estaciones desalobradoras disponen en primer lugar de una serie de instalaciones para la captación y abastecimiento de agua bruta a la planta. El agua bruta se somete a una serie de pretratamientos, cuya finalidad es adecuar su calidad a las condiciones necesarias para optimizar el funcionamiento de las membranas de OI y evitar cualquier daño sobre las mismas. Una vez superada esta fase, el agua buta es sometida a un bombeo de alta presión hasta alcanzar la presión necesaria para el proceso de OI, siendo este el punto de mayor demanda energética de todo el proceso. El agua bruta presurizada se conduce a las membranas de OI, que se organizan en bastidores donde pueden configurarse en distintas etapas o pasos de OI. El agua osmotizada atraviesa la membrana semipermeable y pierde la práctica totalidad de la presión, mientras que la salmuera queda con una presión residual importante, que puede ser recuperada mediante distintas tecnologías para aumentar la eficiencia global del proceso de OI.

El agua osmotizada tiene unas características fisicoquímicas (pH, dureza, índice de Langelier, alcalinidad, etc.) que no permiten su vertido directo a los sistemas de suministro domésticos o de regadío, ni tampoco la hacen apta para dichos usos. Para acondicionar el agua osmotizada se realizan post-tratamientos de estabilización y remineralización, pasando entonces a denominarse AMD.

El rechazo o salmuera tiene generalmente una composición química similar al agua bruta, pero con una mayor concentración de sales, por lo que la gestión de su vertido resulta compleja. En las EDAMs, la solución generalizada consiste en devolverla al mar lejos de la costa, mediante emisarios submarinos y sistemas de mezcla y difusión que minimicen sus impactos en los ecosistemas receptores. En el caso de las estaciones desalobradoras, la problemática es mayor, existiendo distintas alternativas para su tratamiento y gestión que se exponen en el Epígrafe 6.2.

3.2. Captación

El propósito de las instalaciones de captación es asegurar el caudal de agua bruta necesario durante toda la vida de la planta, con la máxima calidad posible, de forma que se reduzcan las necesidades de pretratamientos, sobre todo en lo que al número y concentración de aditivos químicos se refiere, y sin que supongan impactos ambientales inasumibles.

En el caso de las EDAMs, las tecnologías para los procesos de captación se clasifican en captaciones subsuperficiales y captaciones abiertas. Entre las captaciones subsuperficiales se encuentran los sondeos verticales y los drenes horizontales, que en ambos casos se caracterizan por proporcionar un agua de mayor calidad que las captaciones abiertas, ya que el agua es filtrada a través del lecho marino o del acuífero. Como inconveniente, suelen presentar un menor caudal de captación y con menor uniformidad a lo largo de la vida útil de la planta. Entre las captaciones abiertas se encuentran las tomas sumergidas y las tomas en tierra, que ofrecen mayores garantías en cuanto a los caudales a suministrar, pero están más expuestas a posibles efectos locales que afecten a la calidad del agua bruta.

En el caso de las estaciones desalobradoras, el origen del agua bruta puede ser mucho más variado (aguas subterráneas, aguas depuradas, drenajes agrícolas, aguas superficiales, etc.), circunstancia que condiciona el diseño de la instalación de captación. Lo habitual es disponer de pozos con bombas sumergibles en el caso de las aguas subterráneas; de drenes horizontales o tomas directas en canales en el caso de drenajes agrícolas; y de impulsiones o tomas directas desde cámaras de rotura en el caso de aguas depuradas.

En todos los casos, la elección de la tecnología más recomendable queda condicionada por la idiosincrasia de cada proyecto. Sin embargo, dado que la temperatura del agua bruta es un factor determinante en la capacidad de corte de sales de las membranas de OI, la tendencia actual en las EDAMs es intentar garantizar la menor temperatura y la mayor uniformidad de esta variable en el agua bruta a lo largo del año, siendo generalmente las tomas abiertas sumergidas las que mejor permiten optimizar estas variables y una elevada garantía en cuanto a disponibilidad del caudal de agua bruta requerido.

3.3. Pretratamientos

La función de los pretratamientos es adecuar la calidad del agua bruta a las condiciones óptimas en las membranas de OI. La OI, al ser una técnica donde el agua pasa a través de una membrana, exige que los niveles de sólidos en suspensión y material orgánico (arcillas, microalgas, etc.) sean lo más bajos posibles, evitando su rápido ensuciamiento y el correspondiente descenso del factor de conversión. Se diferencia entre pretratamientos físicos y químicos.

Los pretratamientos físicos van encaminados a eliminar del agua partículas, grasas, elementos asociados a sólidos en suspensión, etc. Cuando el agua bruta presenta problemas importantes

de calidad, puede ser necesario disponer en primer lugar de sistemas de desbaste, tamizado, decantación y clarificación del agua bruta. Sin embargo, lo habitual es que el sistema de captación proporcione suficiente calidad para tratarla directamente con sistemas de filtración multimedia (filtros de disco, lechos filtrantes de arena, filtros de cartucho, etc.). La configuración más habitual (Figura 6) consiste en una primera filtración sobre lechos de arena seguida de una segunda filtración con cartuchos de 5-10 µm de paso (microfiltración), que se realiza una vez se han añadido todos los reactivos del pretratamiento químico. Como alternativa a estos sistemas convencionales, las instalaciones de pretratamiento físico pueden consistir en sistemas de microfiltración o ultrafiltración (Figura 6), que tienen la capacidad de producir un agua de mejor calidad, pero que requieren de dosificaciones químicas específicas y sistemas auxiliares, circunstancia que suele derivar en mayores costes de operación y que justifican que sea una alternativa minoritaria.

Figura 6. Pretratamientos físicos más habituales: filtración sobre lechos de arena + filtración con cartuchos (izquierda) y sistemas de microfiltración o ultrafiltración (derecha)

Los pretratamientos químicos consisten en la adición de reactivos con dos objetivos fundamentales: ajustar las características del agua bruta para facilitar su pretratamiento físico, y acondicionarla para reducir los riesgos químicos y biológicos en las membranas de OI, como son: el ensuciamiento químicos y/o biológicos, el ataque a la estructura química de las membranas, la proliferación de microorganismos, precipitaciones y corrosiones, etc., y así optimizar el funcionamiento de las membranas de OI. Dentro del primer conjunto de reactivos se encuentran el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y el cloruro de hierro ($FeCl_3$), que tienen una acción coagulante/floculante sobre las partículas orgánicas y minerales, facilitando su eliminación en los procesos de filtrado. En el segundo grupo de reactivos se encuentran el bisulfito sódico ($NaHSO_3$), un potente agente reductor que elimina la presencia de oxidantes y cloro en el agua bruta, y un antiincrustante, cuya finalidad es evitar la precipitación de sales en las membranas de OI, permitiendo alcanzar un mayor factor de conversión. Adicionalmente, si el agua bruta presenta microalgas o bacterias, puede ser necesaria la aplicación de un biocida, generalmente hipoclorito sódico (NaClO), así como algún tipo de ácido si el pH al final del pretratamiento no es adecuado.

3.4. Ósmosis inversa

La finalidad de la fase de OI es la separación del agua bruta en dos flujos, uno con menor salinidad (agua osmotizada) y otro con mayor salinidad (salmuera), obteniendo con la máxima eficiencia y confiabilidad la calidad de agua y el caudal requeridos en la planta. La Figura 7 muestra el equipamiento empleado y la organización más actual de los distintos flujos de agua

en el proceso de OI en estaciones desaladoras. Se pueden diferenciar tres procesos: el bombeo de alta presión, la OI propiamente dicha, y el sistema de recuperación de energía.

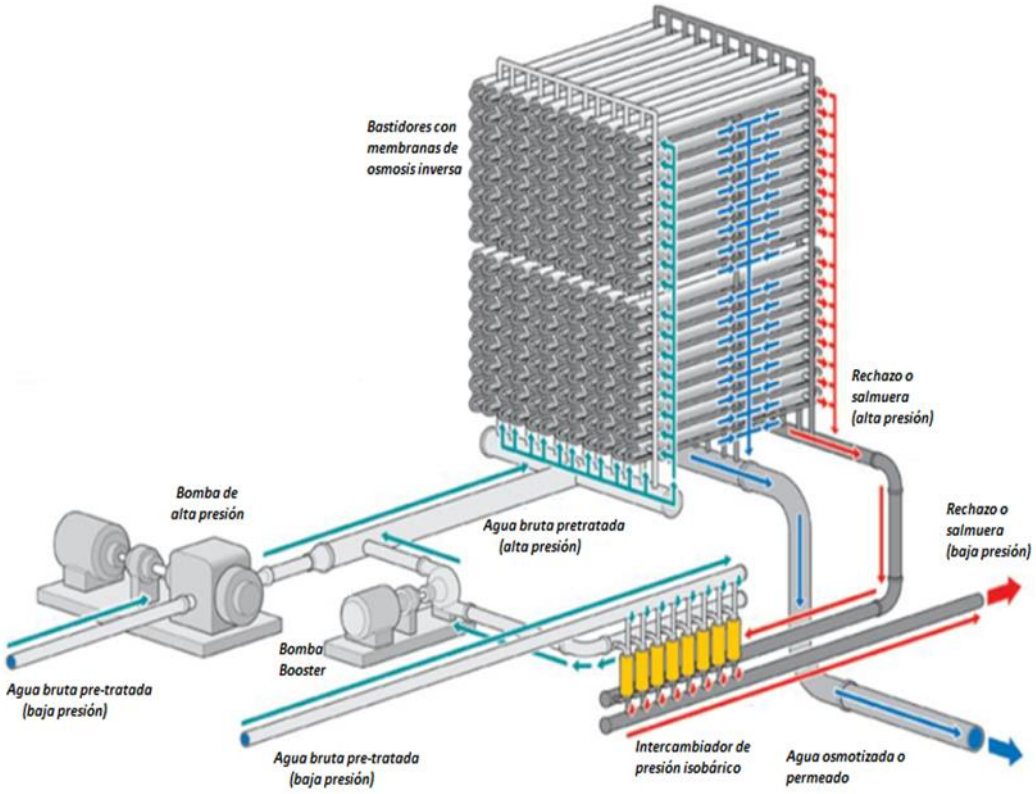


Figura 7. Esquema de funcionamiento en los procesos de ósmosis inversa. Figura adaptada de Poseidon Water (2022)

El sistema de bombeo de alta presión tiene el objetivo de dotar al flujo de agua bruta pre-tratada de la presión necesaria para la separación de sales mediante el proceso de OI. La mejor tecnología disponible para esta finalidad es el empleo de bombas centrifugas multicelulares en las EDAMs, y de bombas centrífugas, generalmente de cámara partida, en desalobración, donde los requerimientos de presión son bastante inferiores.

Una vez que se ha proporcionado la presión necesaria al agua bruta, ésta se conduce a los bastidores con membranas de OI. Estos bastidores consisten en unos tubos horizontales de diámetros normalizados denominados módulos, en cuyo interior se montan las membranas de OI. Actualmente se utilizan membranas de poliamida aromática, que tienen un flujo específico de agua más elevado, una mayor retención de sales y una menor presión de operación que las membranas de acetato de celulosa utilizadas con anterioridad, por lo que disminuyen considerablemente el consumo de energía. La tecnología de membranas más empleada actualmente en desalación es la TFC (*Thin Film Composite*), que consiste en una capa activa de poliamida reticulada densamente aromática (0.2 µm), una capa de soporte de polisulfona microporosa (40 µm), y una base de poliéster considerablemente más gruesa (120-150 µm).

Los sistemas de recuperación de energía tienen como objetivo recuperar la mayor parte posible de la presión residual con la que sale la salmuera, que es igual a la de aporte de la bomba de alta presión menos la pérdida de carga en los bastidores (unos 3 bares generalmente). Se trata del proceso cuya tecnología ha experimentado un mayor avance en las últimas décadas,

permitiendo reducir significativamente los consumos de energía específica en la desalación. De esta forma, se ha pasado de la utilización de bombas invertidas, al empleo de turbinas Francis o Pelton y, actualmente, a los intercambiadores de presión isobáricos. Entre los intercambiadores isobáricos (Figura 7), el más utilizado es el sistema rotativo ERI-PX (Arenas Urrea *et al*., 2019). Se trata de un sistema que para su funcionamiento no requiere de energía eléctrica, ni programador, ni sensores, ni válvulas, alcanzando un rendimiento en torno al 98%.

En estaciones desalobradoras la presión de trabajo es generalmente muy inferior a las EDAMs, por lo que la cantidad de energía recuperable en la salmuera también es más reducida. Por este motivo existen alternativas en la organización de los procesos de OI y en la recuperación de energía, no tan eficientes como los intercambiadores isobáricos, pero que presentan ventajas operativas y menores inversiones. Entre estas configuraciones, la realización de dos etapas de OI, donde la energía residual del rechazo de la segunda etapa es recuperada mediante un turbocompresor (*turbocharger*) para incrementar la presión de entrada a la segunda etapa, es una de las alternativas más eficientes (Figura 8). En este caso, los *turbochargers* permiten recuperar entre el 60 y el 80% de la presión residual de la salmuera.

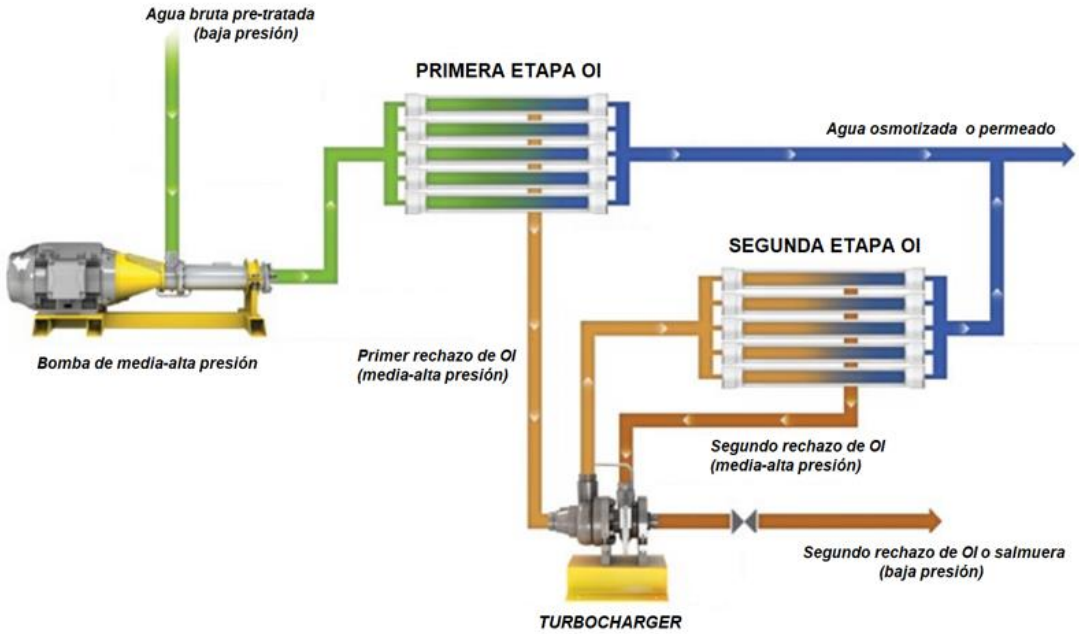


Figura 8. Bastidores de ósmosis inversa para la desalobración en 2 etapas, con recuperación por turbocompesor o *turbocharger*. Figura adaptada de LennTech (2022)

En el caso de las EDAMs, la combinación del uso de membranas de poliamida aromática TFC de alta permeabilidad, e intercambiadores isobáricos rotativos para la recuperación de energía debe permitir alcanzar un consumo específico de energía en los bastidores de OI en torno a 2-2,3 kWh/m^3, cifra que debería quedar por debajo de los 3-3,5 kWh/m^3 al considerar el consumo de todas las fases del proceso en planta (Martínez-Álvarez *et al*., 2019).

3.5. Post-tratamientos

El agua que sale de los bastidores de OI (agua osmotizada) se somete a post-tratamientos que permiten acondicionarla al uso a que va a ser destinada, por lo que la configuración de esta última etapa queda condicionada por dicho uso.

El post-tratamiento más importante es el de remineralización, que es necesario con independencia del uso final del agua desalinizada. La remineralización consiste en aportar sales al agua que permitan incrementar su dureza y alcalinidad, reducir su índice de adsorción de sodio, y equilibrar su índice de Langelier. Hay principalmente dos procedimientos para realizar la remineralización: mediante la adición de CO_2 y una lechada saturada de hidróxido cálcico, o mediante la adición de CO_2 y el uso de lechos filtrantes de calcita, según se muestra en la Figura 9.

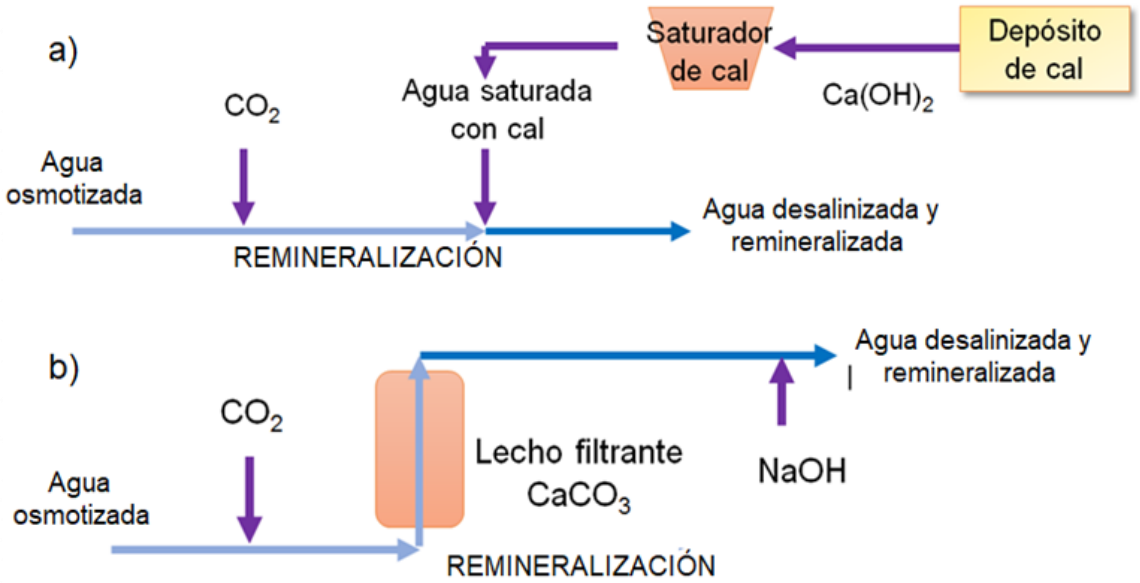


Figura 9. Principales procedimientos para la remineralización del agua osmotizada: a) con lechada de hidróxido cálcico, y b) con lechos filtrantes de calcita

La solución tecnológica más extendida actualmente es la aplicación de lechadas de hidróxido cálcico mediante el empleo de saturadores de cal, que reducen la turbidez en el AMD en comparación con los lechos de calcitas. Estos lechos además conllevan el suministro, manejo y reparto continuo de calcita, así como ciertos riesgos de atascamiento o ensuciamiento asociados a las impurezas que pueda contener, por lo que su operación resulta generalmente más laboriosa.

En plantas desalobradoras para suministro agrícola puede plantearse una alternativa de remineralización, que consiste en la mezcla del agua osmotizada con una pequeña fracción (5-15%) de agua salobre bruta o pretratada. Esta alternativa resulta muy interesante cuando la salinidad del agua bruta procede principalmente de cationes divalentes (Ca^{2+}, Mg^{2+}) y aniones como el bicarbonato (HCO^{3-}) y el sulfato (SO_4^{2-}), ya que en estos casos se pueden corregir los problemas de pH, dureza, alcalinidad e índice de Langelier del agua osmotizada manteniendo unos niveles de salinidad aceptables para el riego agrícola. Sin embargo, cuando la salinidad del agua bruta procede principalmente de los iones Cl^- y Na^+, circunstancia habitual en las zonas litorales, esta alternativa de post-tratamiento sólo conseguirá incrementar la salinidad del agua producto y su concentración en iones perjudiciales para el desarrollo de los cultivos.

En el caso de que el uso final del AMD sea el riego agrícola, el control de la concentración de boro (B) en el agua producto también puede ser objeto de un post-tratamiento específico. La concentración de B en el agua marina desalinizada producida en España se ha limitado tradicionalmente a 1 mg/L, que era el valor máximo recogido en el Real Decreto 140/2003, por

el que se establecían los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano. Este valor ha sido recientemente elevado en el Real Decreto 3/2023 a 1,5 mg/L, excepto cuando en el origen total del agua sea de transición o costera y el tratamiento de potabilización sea de desalación, caso en el que se aplicará un valor máximo de 2,4 mg/L. Sin embargo, estas concentraciones de B (1 a 2,4 mg/L) pueden resultar fitotóxicas para numerosos cultivos, como se indica en el Epígrafe 5.2., por lo que es recomendable disminuir su concentración al menos hasta valores de 0,5 mg/L. Por este motivo, las principales y más modernas EDAMs que suministran a la agricultura en el sureste español (Torrevieja y Águilas) disponen de tecnología para poder limitar la concentración de B en el agua producto en torno a 0,5 mg/L (CEDEX, 2021). Concretamente, la tecnología aplicada consiste en hacer pasar una fracción del agua osmotizada por un segundo paso de OI, empleando membranas especialmente selectivas con el B, de forma que su concentración se reduzca hasta prácticamente 0 mg/L. Esta fracción de agua sometida a un segundo paso por membranas se mezcla con el agua osmotizada procedente del primer paso, en una proporción adecuada para ajustarse a la concentración final de al valor objetivo. La fracción de agua tratada en un segundo paso de OI es variable, ya que hay distintas variables como la temperatura del agua bruta o el pH que condicionan el nivel de selectividad de las membranas en la separación del B.

En el caso de que el uso final del AMD sea el suministro doméstico, también resulta necesario aplicar un post-tratamiento desinfectante, con el fin de garantizar el correcto estado sanitario del agua a lo largo del sistema de distribución. Este tratamiento consiste en la aplicación de productos biocidas, generalmente compuestos clorados. Este tratamiento no resulta necesario en los suministros agrícolas, donde el proceso de OI ya garantiza la ausencia de virus y bacterias en el agua producto, y donde la presencia de compuestos clorados también puede resultar en problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles.

Finalmente, tras el post-tratamiento, el AMD es almacenada y/o entregada a los usuarios mediante los depósitos, balsas, impulsiones y demás sistemas hidráulicos necesarios para satisfacer los requerimientos del punto de entrega.

4. Principales características del agua marina desalada

El estudio y análisis del riego con AMD es una cuestión relativamente reciente, ya que se ha desarrollado principalmente durante las últimas dos décadas. Los trabajos más relevantes sobre esta cuestión (Beltrán y Koo-Oshima, 2006; Yermiyahu *et al*., 2007; Martínez-Álvarez *et al*., 2016; Bar-Tal *et al.,* 2017; Arahuetes *et al*., 2018; Martínez-Álvarez *et al*., 2020; Aznar-Sánchez *et al.,* 2021; Navarro *et al*., 2022; Martínez-Álvarez *et al.,* 2023a) ponen de manifiesto que el AMD tiene características singulares que la diferencian del resto de recursos hídricos desde múltiples perspectivas.

Desde el punto de vista de la planificación hidrológica, el AMD se caracteriza por su condición de recurso hídrico teóricamente inagotable y no sujeto a variaciones climáticas, cuyo suministro se puede escalar para adecuarse a las necesidades de la planificación, por lo que estratégicamente resulta idónea para aumentar la disponibilidad de recursos hídricos cuando se tiene acceso al mar, es decir, en regiones costeras. En el ámbito agrícola, son numerosas las

regiones que, como consecuencia del cambio climático, han visto disminuir los recursos hídricos disponibles y han pasado a ser deficitarias, de forma que el suministro de AMD constituye una medida adaptativa idónea para mitigar estos efectos sobre los recursos hídricos, promoviendo la resiliencia de la agricultura y la seguridad alimentaria. Además, su empleo contribuye a disminuir la presión sobre las masas de agua continentales, favoreciendo el cumplimiento de objetivos ambientales de planificación, como su buen estado de conservación. Del mismo modo, la baja salinidad del AMD permite poner en valor otros recursos marginales para la agricultura, mezclándolos en las proporciones adecuadas.

Desde el punto de vista energético, el AMD se caracteriza por consumo energético asociado a su producción y transporte hasta las zonas regables muy elevado, que generalmente se encuentra entre 4 y 10 veces el del resto de los recursos hídricos. Así, en las plantas desaladoras que abastecen a la agricultura del sureste español el consumo específico de energía varía entre 2,77 y 4,10 kWh/m^3 para la producción, a los que hay que añadir entre 0,50 y 1,13 kWh/m^3 necesarios para el transporte hasta las zonas regables (Figura 10).

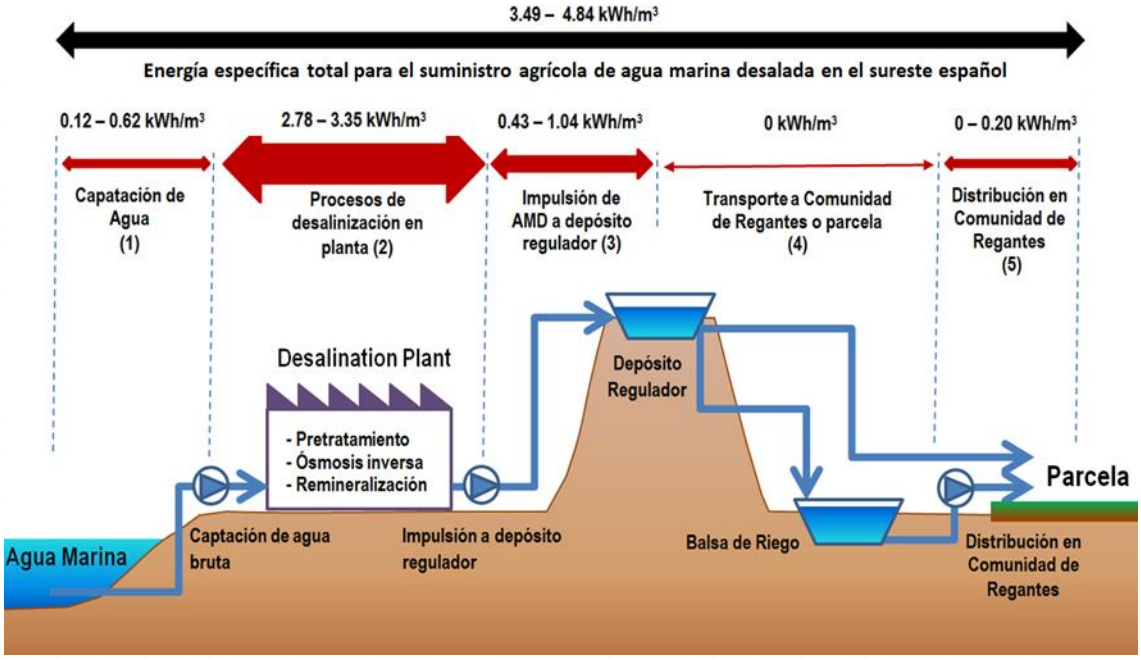


Figura 10. Energía específica por etapas y total del suministro de AMD para riego agrícola en el sureste español. Fuente: Martínez-Álvarez *et al*. (2019)

Como consecuencia del elevado consumo de energía, los costes de producción del AMD también son notablemente superiores al resto de recursos hídricos, y su suministro a los agricultores se caracteriza por un precio muy superior a los que presentan otras fuentes de agua de riego, lo que disminuye su aceptación por parte de los agricultores (Aznar-Sánchez *et al*., 2021) y puede generar un importante impacto en los costes de producción de los cultivos (Martínez-Álvarez *et al*., 2017), llegando a comprometer la viabilidad económica de las explotaciones donde el AMD se convierte en un suministro mayoritario o exclusivo. En este sentido, los costes totales del AMD para riego en el sureste español, incluyendo producción, trasporte y distribución en las comunidades de regantes se encuentran entre 0,50 y 0,65 €/m^3, intervalo en el que también se suelen encontrar los precios finales de suministro a los agricultores (Martínez-Álvarez *et al.,* 2019). El elevado consumo energético asociado a la producción de AMD también puede

conllevar unas importantes emisiones de gases de efecto invernadero, dificultando la lucha contra el cambio climático, circunstancia sobre la que se incide en el Epígrafe 6.1.

Desde el punto de vista fisicoquímico, el AMD se caracteriza generalmente por unas características bastante diferentes a las aguas convencionales, circunstancia que debe tenerse en cuenta cuando se destinan al riego. La Tabla 1 muestra las características fisicoquímicas del AMD procedente de distintas EDAMs que abastecen a la agricultura en el sureste español e Israel.

Tabla 1. Características fisicoquímicas del agua en las EDAMs de Torrevieja, Águilas, Valdelentisco, Hedera (Israel) y Ashkelon (Israel)

Parámetro	EDAM Torrevieja[1]	EDAM Águilas[1]	EDAM Valdelentisco[1]	EDAM Hedera[2]	EDAM Ashkelon[3]
pH	9,1	9,3	8,9	8-8,1	8,0-8,2
CE (dS/m)	0,163	0,452	0,732	0,45	0,2-0,3
Ca^{2+} (mg/L)	12,9	10,5	11,9	32-34	40-46
Mg^{2+} (mg/L)	< 1	2,5	7,4	0	0
Na^{+} (mg/L)	22	74	132	<30	9-10
B (mg/L)	0,39	0,67	0,80	-	0,2-0,3
Cl^{-} (mg/L)	35	119	215	-	12-20
CO_3H^{-} (mg/L)	18	30	18	-	-
CO_3^{2-} (mg/L)	9,8	< 5	5,4	-	-
RAS	2,3	5	7	0,40	0,35

[1] *Martínez-Álvarez et al. (2023)*
[2] *Lahav et al. (2010)*
[3] *Yermiyahu et al. (2007)*

Los valores de la Tabla 1 ponen de manifiesto que existe bastante variabilidad en las características resultantes en cada EDAM, a pesar de que se producen en todos los casos a partir de agua marina y mediante OI. Esta variabilidad se justifica principalmente por el número de pasos de OI y la intensidad del proceso de remineralización. La tendencia actual es incluir un segundo paso de OI en aquellas EDAMs cuya producción se va a destinar principalmente al riego de cultivos, resultando en valores de Conductividad Eléctrica (CE) y concentraciones de Na^{+}, Cl^{-} y B menores a las EDAMs con un solo paso. El agua procedente de los bastidores, tras uno o dos pasos de OI, presenta unas condiciones que no permiten verterla a los sistemas de distribución por su alta capacidad corrosiva y de movilización de precipitados de carbonato, siendo necesario someterlas al proceso de remineralización. En este proceso, en función de su intensidad, las características fisicoquímicas del agua osmotizada se adecúan de la siguiente manera:

- El pH presenta valores ácidos (pH entre 5 y 6), que tras la remineralización pasa a ser básico (entre 8 y 9,5).
- La CE se encuentra generalmente entre 0,4 y 0,7 dS/m cuando se aplica un solo paso de OI, y entre 0,1 y 0,3 dS/m cuando se aplica doble paso de OI, aumentando ligeramente en el proceso de remineralización.
- La dureza del agua, asociada a las concentraciones de los iones Ca^{2+} y Mg^{2+}, es muy baja en el agua osmotizada (2 ó 3 mg/L), y se incrementa en la remineralización aumentando la concentración de Ca^{2+} hasta valores de 10-15 mg/L en las plantas desaladoras españolas y superiores de 32-46 mg/L en las plantas israelís (Tabla 1).

- La alcalinidad, relacionada principalmente con la presencia de bicarbonato y responsable de la capacidad tampón del AMD, también es muy baja en el agua osmotizada, elevándose hasta valores que oscilan entre 18 y 30 mg/L de CO_3H^- en la remineralización.

Al margen de estas características, cuya corrección es necesaria con independencia del uso final del AMD, hay dos aspectos fisicoquímicos del AMD que son de especial relevancia para el riego agrícola. El primero es la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), que se emplea para determinar posibles afecciones a la estabilidad estructural de los suelos agrícolas, y que en el agua osmotizada presenta valores superiores a 9, reduciéndose generalmente en la remineralización a valores por debajo de 5 para mitigar el riesgo de alcalinización del suelo. La segunda es la concentración de B, que puede generar problemas de fitotoxicidad en cultivos sensibles como los cítricos, y que suele presentar valores elevados (0,7 - 1 mg/L) en los procesos de desalación con un solo paso, siendo habitual aplicar un segundo paso de ósmosis en las plantas desaladoras para suministro agrícola con el fin de reducir su concentración, como se observa en las plantas de Torrevieja y Ashkelon (Tabla 1).

Todas estas circunstancias hacen muy recomendable regular la calidad de suministro agrícola de AMD, de forma que se garantice la composición fisicoquímica del producto comercializado. Esta circunstancia ya ha sido abordada en Israel, donde se dispone de una serie de recomendaciones para el suministro simultáneo de AMD para uso doméstico y agrícola (Figura 11). En España, los contratos entre Acuamed y los regantes suelen regular el valor de alguno de los parámetros fisicoquímicos como la CE y el contenido de B, pero no existe una regulación nacional de la calidad del AMD en los suministros agrícolas.

WATER-QUALITY PARAMETERS AFTER DESALINATION

Parameter	Water from Ashkelon desalination plant	Recommendation for domestic and agricultural usage
EC (dS/m)	0.2–0.3	<0.3
$[Cl^-]$ (mg/liter)	15–20	<20
$[Na^+]$ (mg/liter)	9–10	<20
$[Ca^{2+}]$ (mg/liter)	40–46	32–48*
$[Mg^{2+}]$ (mg/liter)	0	12–18
$[SO_4^{2-}\text{-}S]$ (mg/liter)	20–25	>30
[B] (mg/liter)	0.2–0.3	0.2–0.3
Alkalinity (mg/liter as $CaCO_3$)	48–52	>80*
CCPP (mg/liter as $CaCO_3$)	0.7–1.0	3–10*
pH	8.0–8.2	<8.5*

*Value based on the new Israeli recommendations for desalinated water.

Figura 11. Características fisicoquímicas recomendadas para el suministro simultaneo de AMD para uso doméstico y agrícola en Israel. Fuente: Yermiyahu *et al*. (2007)

5. Consideraciones agronómicas del riego con agua marina desalada

La calidad del agua de riego es una cuestión importante a la hora de plantear la sustitución de unos suministros por otros, especialmente cuando se trata de recursos de origen y composición fisicoquímica muy diferente, como generalmente ocurre al reemplazar recursos hídricos convencionales con AMD. Por este motivo, la singularidad de la composición química del AMD

puede producir impactos agronómicos que afecten a la respuesta de los cultivos y, consecuentemente, impactos económicos en las explotaciones.

Así, el AMD presenta muy baja CE (Tabla 1), que puede dar lugar a mejoras en las producciones agrícolas, así como reducciones en las necesidades totales de agua de riego. A pesar de esta baja CE, el AMD se caracteriza por sus altas concentraciones relativas de Na^+, Cl^- y B, mientras que las concentraciones de Ca^{2+}, Mg^{2+} y SO_4^{2-} son notablemente menores a la de las aguas de riego convencionales. Estas circunstancias deben ser consideradas por el regante, adaptando el manejo del riego y la fertirrigación, con el fin de evitar posibles afecciones a la productividad de los cultivos y a la conservación de los suelos agrícolas, adaptaciones que también pueden tener efectos significativos en los costes de producción. Además, la elevada concentración relativa de B en el AMD representa un riesgo de fitotoxicidad, que puede ser importante en el caso de especies/variedades sensibles en explotaciones con un alto porcentaje en el suministro de AMD.

En este epígrafe se analiza (1) el efecto de la escasez de nutrientes en el AMD en las necesidades de fertilización y, consecuentemente, en el coste de los fertilizantes; (2) el riesgo de fitotoxicidad por exceso de B en el agua de riego; y (3) el riesgo de alcalinización del suelo por el desequilibrio entre la concentración de cationes monovalentes (Na^+) y divalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) en el AMD. También pueden producirse otros impactos favorables para el agricultor, como el efecto de la CE del agua en la producción agrícola y en las necesidades de lavado de sales. Así, en el sureste español, Martínez-Álvarez *et al*. (2023a) muestran una disminución de la CE del agua de riego conforme se incorpora AMD al regadío, por lo que se podría esperar un impacto favorable tanto en la producción de los cultivos como en la disminución de la fracción de lavado conforme se van sustituyendo los recursos hídricos convencionales por AMD. Estos efectos asociados a la CE del agua de riego ya se han tratado en el capítulo anterior, al analizar los efectos agronómicos de la reutilización de aguas regeneradas en la agricultura, por lo que se remite al lector a dicho capítulo y a los trabajos de Martínez-Álvarez *et al*. (2023a y 2023b) para profundizar en estos aspectos.

5.1. Efectos de la escasez de nutrientes en la fertilización

Como se muestra en la Tabla 1, el AMD se caracteriza por una muy baja concentración de nutrientes esenciales para el desarrollo de los cultivos, como Ca^{2+} y Mg^{2+}. Sin embargo, estos nutrientes suelen abundar tanto en las aguas superficiales como en las subterráneas, por lo que habitualmente no se consideran o tienen un papel secundario en los programas de fertilización, ya que su contenido en las aguas de riego generalmente satisface las necesidades de los cultivos. Por tanto, la primera cuestión a considerar en el manejo del AMD es evitar carencias nutricionales de Ca^{2+} y Mg^{2+} que afecten a la producción, para lo que resulta necesario adaptar los programas de fertirrigación y así proporcionar las cantidades requeridas de dichos nutrientes, con el posible incremento de coste en fertilizantes. Martínez-Álvarez *et al.* (2023a) analizaron la importancia de este impacto, calculando las necesidades de fertilizantes y el coste asociado para los diez cultivos de regadío con más superficie en el sureste español, considerando las características fisicoquímicas del suministro de agua para tres escenarios: el suministro tradicional de agua de riego, la sustitución del 50% de dicho suministro con AMD, y la sustitución del 100% por AMD. El análisis se realizó mediante un modelo de desarrollo propio que calcula la combinación óptima de fertilizantes para satisfacer los requerimientos totales de nutrientes de cada cultivo al menor coste económico, considerando los nutrientes que ya están presentes en

el agua de riego (Martínez-Álvarez *et al*., 2020; Gallego-Elvira *et al*., 2021). La Figura 12 muestra, para los diez cultivos más representativos del sureste español, el resultado del coste de los fertilizantes, calculado mediante la metodología descrita anteriormente.

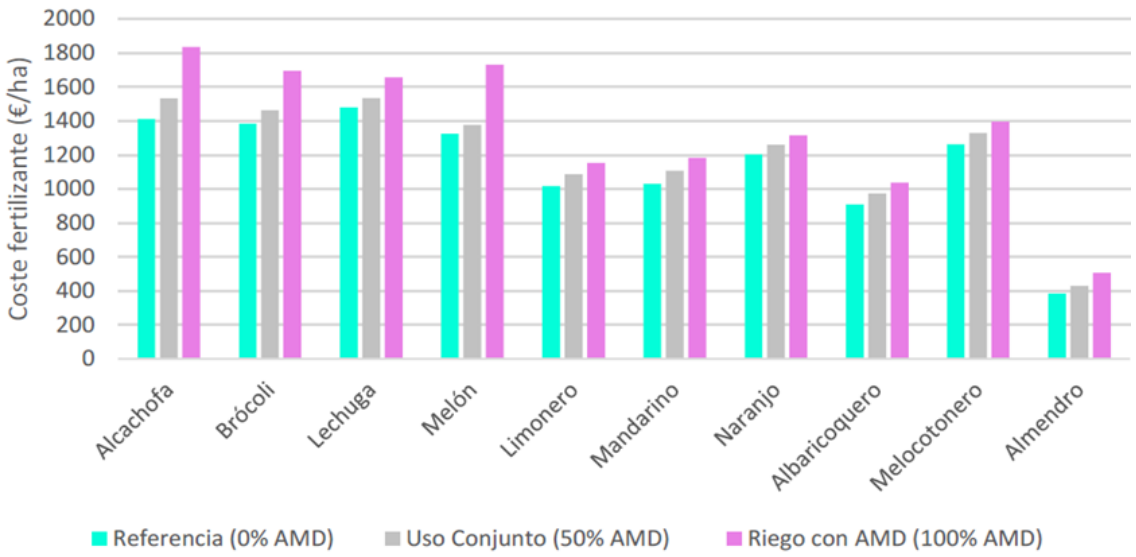


Figura 12. Coste de los fertilizantes de diez cultivos del sureste español para: el suministro tradicional de agua de riego (0% AMD), la sustitución del 50% de dicho suministro con AMD, y la sustitución del 100% por AMD (Martínez-Álvarez *et al.,* 2023a)

Como era de esperar, en todos los cultivos se producen incrementos en el coste de los fertilizantes conforme se incrementa la proporción de AMD. El incremento se sitúa por debajo de 100 €/ha en todos los cultivos cuando se pasa del escenario de referencia (0% AMD) al escenario de uso conjunto (50% AMD), excepto para la alcachofa. Este coste se incrementa más que proporcionalmente cuando se pasa del escenario de referencia (0% AMD) al escenario 100% AMD, llegando a representar valores absolutos en torno a los 300 y 400 €/ha para los cultivos que requieren dosis más importantes de calcio y magnesio (melón, brócoli y alcachofa). En general, se puede afirmar que es un impacto reducido, ya que el coste de operación anual de los cultivos al aire libre en el sureste español suele situarse entre los 10.000 y 20.000 €/ha, por lo que sólo representa incrementos entre el 1 y el 4% de estos costes. Estos resultados también ponen de manifiesto que, en lo que al incremento de costes en fertilizantes se refiere, el escenario de uso conjunto (50% AMD) mitiga el impacto que se produce, ya que en este caso el aumento del coste de los fertilizantes se sitúa por debajo del 1% de los costes de operación.

Todos los cultivos seleccionados en el estudio de Martínez-Álvarez *et al*. (2023a) se desarrollan con sistemas de producción sobre el suelo y al aire libre. Sin embargo, cuando consideramos sistemas de cultivos más intensivos, el impacto de la escasez de nutrientes puede hacerse bastante más importante. En este sentido, Ben-Gal *et al.* (2009) determinaron en Israel que el incremento del coste de fertilizantes en el cultivo de pimiento en invernadero con un sistema hidropónico, al sustituir el suministro de agua convencional por agua desalada, alcanzaba los 3.500 $/ha. Esta cifra fue refrendada para el cultivo de pimiento en invernadero con un sistema hidropónico bajo las condiciones agrícolas del sureste español, donde Martínez-Álvarez *et al.* (2020) determinaron un incremento de 3.150 €/ha para la sustitución del suministro de agua convencional por AMD.

5.2. Riesgo de fitotoxicidad por boro

La segunda cuestión agronómica a considerar es el riesgo de fitotoxicidad por una elevada concentración de B en el AMD. El B es un oligoelemento esencial para el crecimiento, desarrollo y productividad de los cultivos hortofrutícolas. Pequeñas concentraciones de B son necesarias para el crecimiento de las plantas, pero pueden aparecer signos de toxicidad cuando se exponen a concentraciones más altas. Generalmente hay una pequeña ventana entre las concentraciones que producen deficiencia y toxicidad por B, de forma que concentraciones en torno a 0,2 mg/L en el agua de riego pueden cubrir las necesidades como micronutriente esencial, pero concentraciones en torno a 0,5 mg/L pueden dar lugar a problemas de fitotoxicidad en los cultivos más sensibles. Las concentraciones de B en las aguas de riego superficiales son generalmente inferiores a 0,1 mg/L, por lo que suelen ser necesarios aportes complementarios en forma de fertilizantes (mediante complejos de micronutrientes) para el correcto desarrollo de los cultivos. Sin embargo, el AMD se caracteriza por presentar concentraciones de B notablemente superiores a las aguas superficiales (Tabla 1), siendo habitual encontrar valores en torno a 1 mg/L en las plantas con un solo paso de OI. Estas concentraciones satisfacen holgadamente las necesidades de los cultivos, y podrían incluso llegar a producir fitotoxicidad en el caso de cultivos sensibles, afectando a su correcto desarrollo vegetativo y, consecuentemente, a su productividad. Valores crecientes en la concentración de B intensifican los efectos fitotóxicos, pudiendo llegar a producir efectos más críticos como la marchitez permanente del cultivo o la contaminación del suelo (Goldberg, 1993; Gupta, 2007)

La fitotoxicidad por B no suele ser el resultado de su contenido original en el suelo, sino de su incremento como consecuencia de su presencia en el agua de riego en altas concentraciones, por lo que la gestión de este problema y sus soluciones está generalmente relacionada con la fuente de suministro de agua y la propia gestión del riego (Reid, 2004). En el regadío del sureste español existe actualmente una preocupación creciente sobre esta problemática, dado que en su ámbito geográfico confluyen los principales factores de riesgo: una masiva y creciente incorporación al riego de agua con elevada concentración de B (AMD y agua regenerada), una alta presencia de cultivos sensibles como los cítricos y los frutales de hueso, y unas condiciones climáticas de carácter árido o semiárido.

El boro en el agua marina desalada

El B es un elemento relativamente abundante en agua de mar, donde se encuentra presente principalmente como ácido bórico (H_3BO_3) y en concentraciones superiores a los 5 mg/L. Las membranas de OI alcanzan un elevado rechazo del B cuando se encuentra en forma de anión borato (BO_3^{3-}), es decir, a pH alto, mientras que el rechazo es bajo cuando se encuentra en forma de ácido bórico, que es la especie que predomina a pH más bajo (Imbernón-Mulero *et al*., 2022). El nivel de rechazo del B en la OI depende además de la temperatura del agua de mar, de tal modo que un descenso mejora la calidad del permeado.

Bajo las condiciones normales en el sureste español, los procesos de OI de agua marina en una sola etapa resultan en concentraciones de B entre 0,7 y 1 mg/L. Cuando se requieren concentraciones inferiores se recurre a sistemas de OI de doble paso. Esta circunstancia se da en diversas EDAMs del sureste español e Israel, cuya producción se destina mayoritariamente al riego agrícola, como las de Torrevieja, Águilas y Ashkelon (Tabla 1).

Tolerancia de los cultivos al boro

La definición de los límites de tolerancia de B en el agua de riego para distintos cultivos es un proceso complejo que conlleva un enorme esfuerzo experimental. Hay una serie de factores basados en la variedad de cultivos, el tipo de suelo, la química del agua, las condiciones climáticas y las prácticas de gestión del riego que desempeñan un papel importante y que pueden condicionar los resultados obtenidos (Grattan *et al*., 2015). Independientemente de esta complejidad, el objetivo final de este campo de trabajo es establecer unos límites de calidad del agua de riego, en lo que a su concentración de B se refiere, que garanticen la sostenibilidad agronómica para el riego de los cultivos uso a largo plazo.

Gran parte de los datos existentes sobre la tolerancia al B en los cultivos se obtuvieron a partir de los experimentos realizados en la primera mitad del siglo XX por Haas (1929) y Eaton (1944). Estos datos proporcionaron umbrales de tolerancia para más de 40 cultivos diferentes, incluyendo los más extendidos a nivel global. Los valores propuestos por estos autores fueron recogidos en distintas publicaciones, hasta su inclusión en el manual técnico de la FAO Water quality for agriculture (Ayers y Westcot, 1994), donde se vinculan los distintos niveles de tolerancia o sensibilidad a la concentración de B en la solución del suelo. Esta información (Tabla 2) se ha generalizado como principal referencia para esta cuestión.

La Tabla 2 pone de manifiesto que los cultivos más sensibles son los leñosos, especialmente los cítricos (naranjo, mandarino y limonero) y los frutales de hueso (albaricoquero, melocotonero y almendro), mientras que afecta en menor medida a los cultivos de ciclos vegetativos cortos, como los cultivos hortícolas y los herbáceos. Sin embargo, para la correcta interpretación de la Tabla 2, hay que tener en cuenta que los autores indican que sus valores se refieren a la concentración máxima de B tolerada en el extracto de saturación del suelo sin que se produzcan reducciones del rendimiento o del crecimiento vegetativo. Los valores de concentración de B en el extracto de saturación del suelo son generalmente superiores a los existentes en el agua de riego, considerándose generalmente que es entre 1,4 y 1,9 veces superior a la concentración de B en el agua de riego, cuando fracción de drenaje es moderada, es decir, en torno al 25% (Jame *et al.,* 1982).

El riesgo de fitotoxicidad por boro en el sureste español

Durante los próximos años se va a producir un notable incremento de la concentración de B en el agua de riego de numerosas zonas regables del sureste español, ya que la planificación hidrológica prevé una paulatina disminución de los recursos hídricos convencionales, que se pretende compensar con incrementos en el suministro de AMD. Esta circunstancia, junto al manejo de cultivos sensibles a la fitotoxicidad por B (cítricos, albaricoquero y melocotonero) y la presencia de unas condiciones climáticas áridas o semiáridas, justifica la creciente preocupación sobre la aparición de problemas de fitotoxicidad por B.

Las principales EDAMs destinadas a aportar volúmenes de agua de riego en esta región son Torrevieja, Águilas y Valdelentisco (Tabla 1). Las dos primeras disponen de tecnología específica de doble paso para suministrar AMD, resultando en concentraciones de B por debajo de 0,5 mg/L, mientras que Valdelentisco no dispone de esta tecnología, lo que da lugar a concentraciones de B en el AMD que generalmente oscilan entre 0,8 y 1 mg/L.

Tabla 2. Umbral de concentración de B en el extracto de saturación de suelo que produce fitotoxicidad en los cultivos. Fuente: Ayers y Westcot (1994)

Muy sensible (<0,5 mg/l)	
Limón	*Citrus limon*
Blackberry	*Rubus spp.*
Sensible (0,5 - 0,75 mg/l)	
Aguacate	*Persea americana*
Pomelo	*Citrus X paradisi*
Naranja	*Citrus sinensis*
Albaricoque	*Prunus armeniaca*
Melocotón	*Prunus persica*
Cereza	*Prunus avium*
Ciruela	*Prunus domestica*
Caqui	*Diospyros kaki*
Higo, kadota	*Ficus carica*
Uva	*Vitis vinifera*
Nogal	*Juglans regia*
Pecan	*Carya illinoiensis*
Guisante de vaca	*Vigna unguiculata*
Cebolla	*Allium cepa*
Sensible (0,75 - 1,0 mg/l)	
Ajo	*Allium sativum*
Batata	*Ipomoea batatas*
Trigo	*Triticum eastivum*
Cebada	*Hordeum vulgare*
Girasol	*Helianthus annuus*
Alubia, mungo	*Vigna radiata*
Sésamo	*Sesamum indicum*
Lupino	*Lupinus hartwegii*
Fresa	*Fragaria spp.*
Alcachofa, Jerusalén	*Helianthus tuberosus*
Alubia, riñón	*Phaseolus vulgaris*
Alubia, lima	*Phaseolus lunatus*
Cacahuete/maní	*Arachis hypogaea*

Moderadamente sensible (1,0 - 2,0 mg/l)	
Pimiento rojo	*Capsicum annuum*
Guisante	*Pisum sativa*
Zanahoria	*Daucus carota*
Rábano	*Raphanus sativus*
Patata	*Solanum tuberosum*
Pepino	*Cucumis sativus*
Moderadamente tolerante (2,0 - 4,0 mg/l)	
Lechuga	*Lactuca sativa*
Col	*Brassica oleracea capitata*
Apio	*Apium graveolens*
Nabo	*Brassica rapa*
Bluegrass, Kentucky	*Poa pratensis*
Avena	*Avena sativa*
Maíz	*Zea mays*
Alcachofa	*Cynara scolymus*
Tabaco	*Nicotiana tabacum*
Mostaza	*Brassica juncea*
Trébol, dulce	*Melilotus indica*
Calabaza	*Cucurbita pepo*
Melón	*Cucumis melo*
Tolerante (4,0 - 6,0 mg/l)	
Sorgo	*Sorgo bicolor*
Tomate	*Lycopersicon lycopersicum*
Alfalfa	*Medicago sativa*
Artemisa, púrpura	*Vicia benghalensis*
Perejil	*Petroselinum crispum*
Remolacha, roja	*Beta vulgaris*
Remolacha azucarera	*Beta vulgaris*
Muy tolerante (6,0 - 15,0 mg/l)	
Algodón	*Gossypium hirsutum*
Espárragos	*Asparagus officinalis*

Si nos centramos en los cultivos predominantes en el sureste español (Martínez-Álvarez *et al.*, 2023b), y tenemos en cuenta los umbrales de la Tabla 2, se observa que los cultivos hortícolas (alcachofa, brócoli, lechuga y melón) no tienen tiempo de acumular durante sus ciclos de producción concentraciones fitotóxicas de B para las concentraciones propias de B en el AMD. Sin embargo, los cultivos leñosos (naranjo, mandarino, albaricoquero y melocotón) son especialmente sensibles al agua de riego procedente de Valdelentisco (0,8 - 1 mg/L de B), pero no lo serían al agua procedente de Torrevieja (menos de 0,5 mg/L de B). La EDAM de Águilas presenta valores intermedios de B (0,67 mg/L), que también podrían afectar a estos cultivos leñosos en el medio-largo plazo. Finalmente, en el caso del limonero, que se trata del cultivo más sensible, podría verse incluso afectado por el suministro desde la EDAM de Torrevieja. Por tanto, existe un evidente riesgo de fitotoxicidad en cultivos leñosos si se riegan con un 100% de AMD. En caso de limitarse el porcentaje de AMD al 50%, la concentración media de B en el agua de riego disminuiría hasta los 0,2 mg/L en Torrevieja, hasta los 0,34 mg/L en Águilas, y hasta 0,4

mg/L en Valdelentisco, desapareciendo prácticamente el riesgo de fitotoxicidad por B en los leñosos.

Es necesario indicar que los valores recogidos en la Tabla 2 provienen de estudios realizados bajo condiciones agronómicas muy distintas de las existentes actualmente en el sureste español, por lo que deben considerarse sólo como una referencia, siendo recomendable en todas las explotaciones con cultivos sensibles regadas con un alto porcentaje de AMD realizar un control de la evolución anual de la concentración de B en hoja del cultivo.

5.3. Riesgo de alcalinización del suelo

Para que los cultivos puedan alcanzar sus producciones potenciales requieren tener un adecuado equilibrio entre humedad y aireación del suelo, equilibrio que está directamente relacionado con la estructura del suelo. La alta concentración de cationes monovalentes (Na^+) en relación a los cationes divalentes (Ca^{2+} y Mg^{2+}) en el AMD puede dar lugar a la dispersión de las arcillas, dañando la estructura del suelo y afectando a sus propiedades físicas, fenómeno que se conoce como alcalinización o sodificación del suelo. Los principales efectos asociados a la alcalinización del suelo son: disminución de la conductividad hidráulica, incremento de la erosión, compactación y disminución de la aireación (Mandal *et al*., 2008).

El riesgo de alcalinización de un suelo a medio y largo plazo depende de la conductividad eléctrica del agua de riego y de su Relación de Adsorción de Sodio (RAS), que se evalúa mediante la expresión $RAS = [Na^+]/([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])^{1/2}$, donde todas las concentraciones se expresan en mmol/L (Ayers y Westcot, 1994). En base a estas variables, el riesgo se clasifica en “severo”, “ligero o moderado” y “sin riesgo” (Figura 13).

El agua osmotizada, antes del post-tratamiento de remineralización en la EDAM, se caracteriza por tener una alta concentración de Na^+ y concentraciones prácticamente nulas de Ca^{2+} y Mg^{2+}, resultando en valores de RAS muy elevados, que junto a la baja salinidad resulta en un riesgo severo de alcalinización del suelo. Los postratamientos de remineralización consiguen reducir los valores de RAS, incrementando la concentración de Ca^{2+}, con lo que disminuye parcialmente el riesgo de alcalinización de los suelos, aunque puede seguir siendo severo si la remineralización es poco intensa. Además, cabe destacar que los procesos de fertirriego en parcela suelen incrementar la presencia de cationes divalentes, atenuando aún más el riesgo de alcalinización de suelos (Martínez-Álvarez *et al*., 2023b).

La Figura 13 muestra el riesgo de alcalinización del suelo del AMD suministrada por las EDAMs de la Tabla 1. Se observa como las diferencias en la configuración del post-tratamiento (existencia de un segundo paso de OI e intensidad de la remineralización) resulta en valores de CE entre 0,20 y 0,73 dS/m, y de RAS entre 0,35 y 7. Así, la EDAM de Torrevieja presenta un riesgo severo de alcalinización del suelo; mientras que el resto presentan un riesgo de alcalinización ligero a moderado. Estos resultados ponen de manifiesto que la tecnología de las EDAMs afecta al riesgo de alcalinización de suelo, siendo necesario garantizar una remineralización suficiente para evitar la zona de mayor riesgo.

Los resultados del AMD contrastan con las muestras de agua de riego superficial y subterránea del sureste español (Figura 13), que no presentan riesgo de alcalinización del suelo, por lo que cuando el AMD se maneje de forma conjunta con estos recursos convencionales dicho riesgo disminuirá.

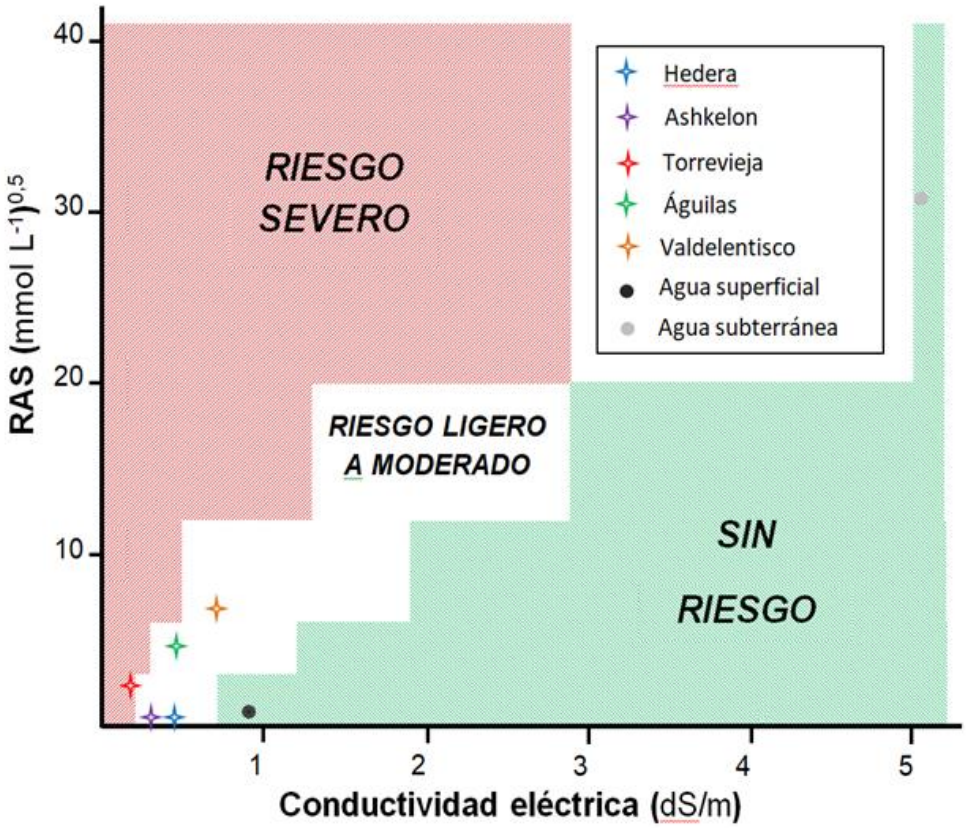


Figura 13. Riesgo de alcalinización del suelo a medio y largo plazo del AMD de las EDAMs de Hedera, Ashkelon, Torrevieja, Águilas y Valdelentisco. Los puntos representan el resultado de una muestra de agua superficial y otra de agua subterránea del sureste español

6. Principales aspectos de la sostenibilidad de la desalación como fuente de agua para riego

La desalación de agua marina puede ser una solución sostenible ante la escasez de agua para riego en zonas áridas, siempre que se aplique teniendo en cuenta los aspectos técnicos, económicos, sociales y ambientales que implica (Zolghadr-Asli *et al*., 2023). La desalación ofrece una fuente de agua alternativa y complementaria a las fuentes convencionales, que puede contribuir a mejorar la calidad de vida del agricultor y la resiliencia de la agricultura de regadío, pero no debe interpretarse como una solución mágica ni definitiva para ajustar los recursos hídricos disponibles a las demandas, sino una nueva herramienta de planificación hídrica que debe ser usada de forma racional, eficiente y responsable.

Para conseguir la sostenibilidad ambiental, el suministro masivo de AMD a la agricultura debe afrontar importantes aspectos ambientales (Elsaid *et al*., 2020), entre los que destacan: los posibles daños sobre la fauna en la captación de agua marina; la ocupación del territorio y el impacto visual de las instalaciones de desalación; la elevada emisión de gases de efecto invernadero asociada a su importante consumo energético; y el vertido de las salmueras, que pueden afectar a los ecosistemas receptores. En este epígrafe, se analizan específicamente los dos últimos.

6.1. Emisión de gases de efecto invernadero

Martin-Gorriz *et al*. (2021) evaluaron, mediante la técnica de análisis de ciclo de vida, el balance de carbono de los diez cultivos de regadío más representativos del sureste español, concluyendo que todos ellos eran sumideros de carbono, es decir, que las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a todas las actividades requeridas para su producción eran menores que la secuestración de carbono por parte del propio cultivo. Entre las distintas actividades involucradas en la producción (producción de fertilizantes, producción de fitosanitarios, producción de maquinaria, producción de plantones, sistema de riego y labores de campo), el sistema de riego fue la actividad que implicaba mayores emisiones de gases de efecto invernadero (36% del total). Estas emisiones del sistema de riego se producen principalmente por el consumo energético asociado al suministro y manejo del agua de riego. Como se ha indicado en el Epígrafe 4, el AMD se caracteriza por un consumo específico de energía asociado a su producción y transporte hasta las zonas regables muy superior al resto de los recursos hídricos. La Figura 14 muestra esta circunstancia en el contexto del sureste español.

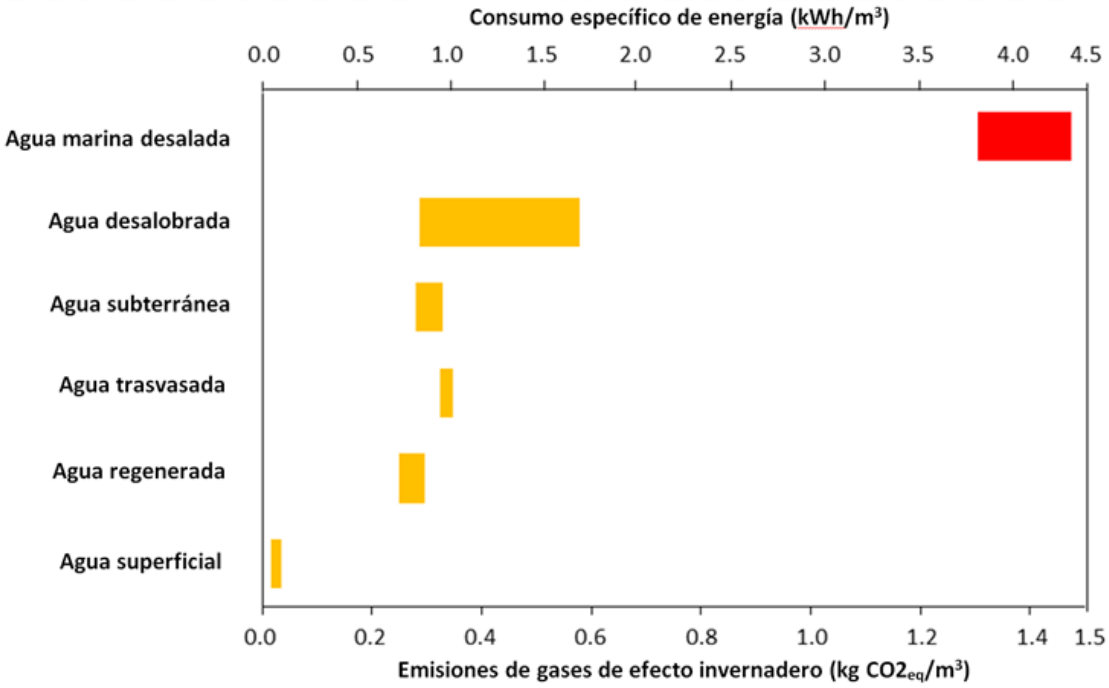


Figura 14. Consumo de energía específica y emisiones de gases de efecto invernadero de distintas fuentes de agua de riego en el sureste español (Martínez-Álvarez *et al*., 2016)

Por tanto, si en un cultivo se sustituye parcial o totalmente el suministro de agua tradicional por AMD, la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al sistema de riego aumentará y, consecuentemente, también las del cultivo. Este análisis también lo abordaron Martin-Gorriz *et al*. (2021), concluyendo que el peso del sistema de riego en las emisiones en un escenario de sustitución parcial (50%) por AMD aumentaba hasta el 43% del total, de forma que el rol de todos los cultivos como sumidero de CO_2 se atenúa, llegando algún hortícola como la alcachofa a convertirse en fuente de CO_2, es decir, a emitir más CO_2 a la atmosfera del que secuestra el cultivo. Adicionalmente, analizaron el escenario de sustitución total por AMD, bajo el cual el sistema de riego fue responsable del 57% de las emisiones, y todos los cultivos hortícolas y el mandarino se convirtieron en fuentes de CO_2; permaneciendo como sumideros limonero, naranjo, albaricoquero y melocotonero. Por tanto, el análisis de las emisiones de gases

de efecto invernadero asociadas al uso intensivo del AMD para riego es de máxima relevancia, ya que puede llegar a cambiar el rol de la agricultura de regadío como sumidero de CO_2 en la lucha contra el cambio climático.

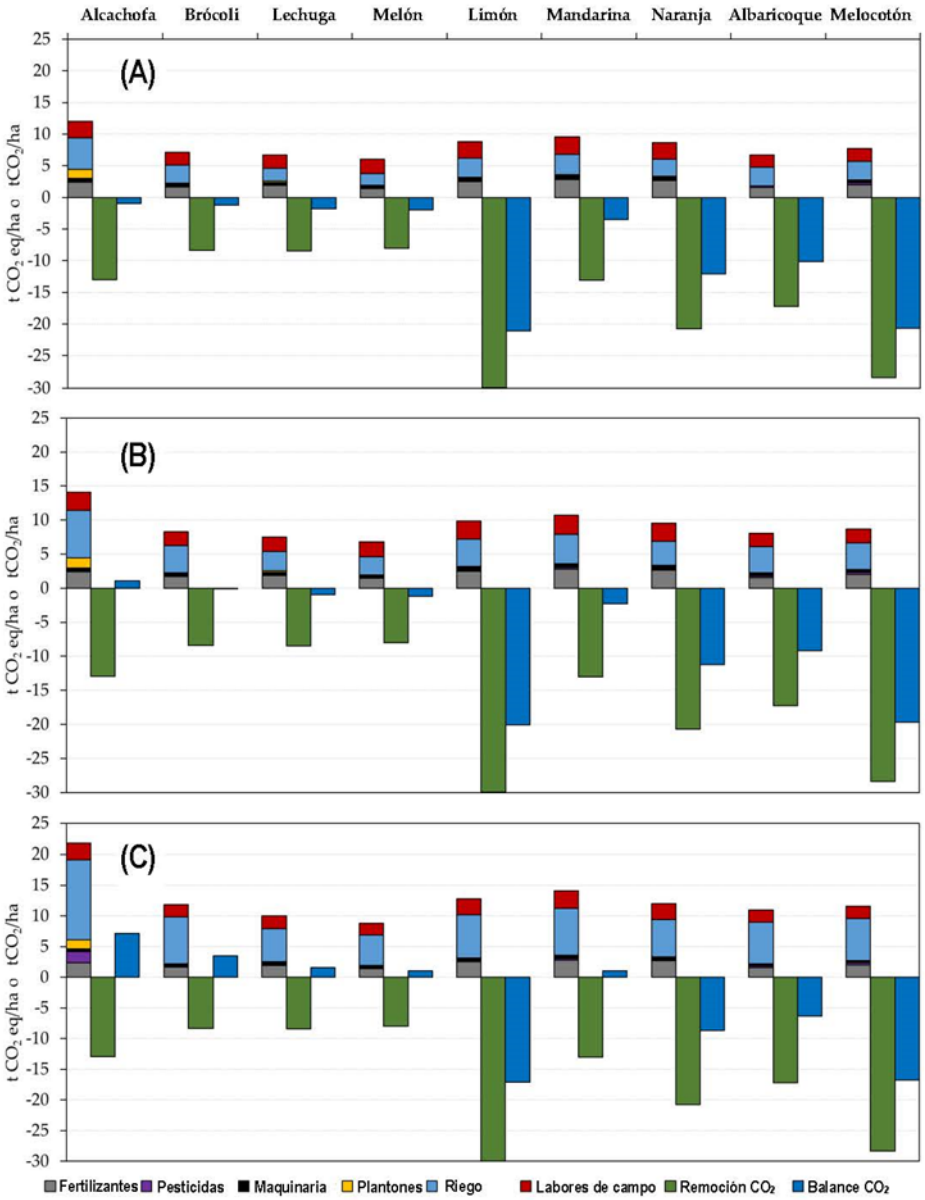


Figura 15. Balance de Carbono de los diez cultivos de regadío más representativos del sureste español como diferencia entre (1) las emisiones de gases de efecto invernadero de sus actividades productivas y (2) la remoción o secuestración de CO_2 por parte del cultivo. Se muestran tres escenarios de suministro de agua de riego: (a) escenario tradicional sin AMD, (b) escenario con 50% AMD, y (c) escenario con 100% AMD. Fuente: Martin-Gorriz *et al*. (2016)

Estos resultados ponen de manifiesto que, aunque el suministro agrícola de AMD puede mitigar los importantes efectos del cambio climático sobre la disponibilidad de recursos hídricos para riego, lo hace exacerbando las emisiones de CO_2 a la atmósfera y, consecuentemente, retroalimentando la principal causa del cambio climático. Esta problemática se debe a la elevada huella de carbono del sistema energético, por lo que para fomentar la sostenibilidad y compatibilidad con las políticas de lucha contra el cambio climático resulta necesario incorporar fuentes de energía de baja huella de carbono al sistema de abastecimiento energético, es decir,

generar la energía necesaria para la desalación con fuentes renovables. En este sentido, Acuamed (2023) está implementando nuevas plantas fotovoltaicas para alimentar a sus principales EDAMs del sureste español, de forma que prevé satisfacer el 35% de su demanda energética mediante el autoconsumo de estas plantas.

6.2. Tratamiento y gestión de salmueras

En general, la salmuera de una EDAM es básicamente agua de mar concentrada con aproximadamente el doble de su salinidad, más trazas de los productos químicos utilizados en el pretratamiento (especialmente antiincrustante) y los caudales procedentes de la estación de tratamiento de los distintos efluentes generados en la planta. En el caso de estaciones desalobradoras, la problemática de las salmueras es más diversa y compleja, ya que su composición fisicoquímica puede variar sustancialmente en función del origen del agua. Además, las aguas salobres, tanto subterráneas como de origen agrícola, pueden presentar elementos tóxicos o contaminantes, que se concentrarán en la salmuera, pudiendo limitar su vertido a cualquier otra masa de agua. Un claro ejemplo es la presencia de nitratos en las aguas salobres generadas en zonas regables, o la de fosfatos en las aguas regeneradas salobres, que pueden favorecer procesos de eutrofización en las masas de agua receptoras. La problemática de las salmueras contaminantes puede incluso hacer inviables algunos proyectos de desalobración. Actualmente, las principales alternativas para la gestión y valorización de salmueras son la descarga de las salmueras en masas de agua, la concentración de salmueras y la valorización de salmueras (Zarzo *et al*., 2017).

Respecto a la descarga de las salmueras en masas de agua, la práctica totalidad de las EDAMs vierten sus salmueras al mar. Estas descargas requieren estudios de impacto ambiental, de las corrientes marinas, del estado fisicoquímico del agua, de temperatura, etc., al objeto de determinar el punto de descarga más adecuado y con menor impacto. Además, es habitual la aplicación de modelos matemáticos para determinar la dilución y dispersión del vertido de salmuera en el medio receptor. Estos estudios sirven para implementar medidas que favorezcan la dilución y dispersión de la salmuera, evitando daños medioambientales. Estos daños surgen porque la densidad de la salmuera es más elevada que la del agua marina y tiende a acumularse en las depresiones del fondo marino, alterando sus características fisicoquímicas (pH, oxígeno disuelto, sólidos en suspensión, etc.), y pudiendo alterar los ecosistemas receptores. Por estos motivos, deben evitarse zonas de vertido con alto valor ecológico, como las praderas de Posidonia oceánica en el Mediterráneo, y resulta imprescindible un programa de seguimiento ambiental que permita adoptar medidas correctoras ante cualquier afección incontrolada. Por lo tanto, el vertido de la salmuera de una EDAM al mar no debe representar un problema desde el punto de vista ambiental si se atienden todos estos requerimientos.

En el caso de las estaciones desalobradoras, la mayor parte de sus salmueras también se han vertido tradicionalmente al mar o a masas de aguas continentales, o incluso directamente a sistemas de saneamiento, pero los problemas con elementos tóxicos o contaminantes limitan actualmente estas alternativas de vertido, llegando incluso a impedir el funcionamiento de muchas pequeñas desalobradoras que venían deshaciéndose de sus salmueras por estos procedimientos. Otra alternativa para la descarga de salmueras (principalmente para instalaciones de interior) es la inyección en acuíferos profundos, práctica que está muy extendida en países como Estados Unidos, aunque no es posible en España.

La concentración de salmueras tiene como objetivo obtener una salmuera lo más concentrada posible con el fin de reducir su volumen y facilitar su gestión. Se dispone de dos métodos para concentrar las salmueras, que consisten en incrementar la conversión del sistema para producir más agua producto a partir de la misma cantidad de agua bruta, incluso con pasos adicionales por membranas semipermeables, y en incrementar la concentración de la salmuera por evaporación, mediante el empleo de energía artificial (evaporadores industriales) o natural (balsas de evaporación pasiva o forzada mediante aspersores).

La valorización de salmueras es sin duda el destino más interesante desde cualquier punto de vista: ambiental, económico o técnico. Esta valorización puede realizarse en las propias desaladoras o mediante aplicaciones potenciales de las salmueras. La valorización de la salmuera en las propias desaladoras se refiere al aprovechamiento de su energía residual mediante sistemas de recuperación de energía (ya tratados en el Epígrafe 3.4), a su uso en tratamientos de limpieza, y a la producción de productos químicos in-situ. Las aplicaciones potenciales de las salmueras se refieren a su conversión en productos o subproductos, como la obtención de sales mediante la evaporación natural o extracción con disolventes orgánicos, la obtención de productos de valor económico como la fabricación de hipoclorito sódico, la alimentación de especies acuáticas como la Tilapia o algas extremófilas como la Spirulina en acuicultura, o la conversión en suplementos alimenticios para el ganado, entre otros. Muchos de estos usos se encuentran actualmente bajo estudio e investigación.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades, la Agencia Estatal de Investigación (MICIU/AEI/10.13039/501100011033, España) y el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER, UE), una manera de hacer Europa, en el marco del proyecto SEA4CROP (PID2020-118492RA-C22). Además del programa AGROALNEXT (PRTR-C17.I1), financiado por la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia a través de la Fundación Séneca -Agencia de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia y del programa de la Unión Europea NextGenerationEU. Finalmente, se agradece el apoyo de la Cátedra Trasvase y Sostenibilidad – José Manuel Claver Valderas de la Universidad Politécnica de Cartagena.

Bibliografía

Ayers, R.S.; Westcot, D.W. (1994). Water quality for agriculture. Estudio de Riego y Drenaje No. 29. Organización de las Naciones Unidades para la Agricultura y la Alimentación, Roma, 174 p.

Arahuetes, A.; Hernández, M.; Rico, A.M. (2018). Adaptation strategies of the hydrosocial cycles in the Mediterranean Region. Water 10: 790, https://doi.org/10.3390/w10060790

Aznar-Sánchez, J.A.; Belmonte-Ureña, L.J.; Velasco-Muñoz, J.F.; Valera, D.L. (2021). Farmers' profiles and behaviours toward desalinated seawater for irrigation: Insights from South-east Spain. Journal of Cleaner Production 296: 126568. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126568

Acuamed (2023). Acuamed, Infraestructuras para la Agricultura. En "Agua, una encrucijada en el levante español", viernes 15 de diciembre de 2023. https://www.iagua.es/eventos/agua-encrucijada-levante-espanol

Arenas Urrea, S.; Díaz Reyes, F.; Peñate Suárez, B.; de la Fuente Bencomo, J.A. (2019). Technical review, evaluation and efficiency of energy recovery devices installed in the Canary Islands desalination plants. Desalination 450: 54–63.

Bar-Tal, A.; Yermiyahu, U.; Ben-Gal, A.; Schwartz, A.; Faingold, I.; Seligmann, R. (2017). Optimization of calcium and magnesium concentrations for fertigation of tomato with desalinated water. Israeli Journal of Plant Science 64: 80–91.

Beltran, J.M.; Koo-Oshima, S. (2006). Water desalination for agricultural applications. Proceedings of the FAO Expert Consultation on Water Desalination for Agricultural Applications, Food and Agriculture Organization, Rome.

Ben-Gal, A.; Yermiyahu, U.; Cohen, S. (2009). Fertilization and blending alternatives for irrigation with desalinated water. Journal of Environmental Quality 38: 529–536.

CEDEX (2021). Estudio del CEDEX sobre límite impuesto al boro en las aguas del post trasvase. Anexo VIII del Anexo III del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2022-2027. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Curto, D.; Franzitta, V.; Guercio, A. (2021). A Review of the Water Desalination Technologies. Applied Sciences 11: 670, https://doi.org/10.3390/app11020670

Daghari, I.; El Zarroug, M.R.; Muanda, C.; Kompany, J.R.; Kanzari, S.; Mimoun, A.B. (2021). Feasibility of water desalination for irrigation: the case of the coastal irrigated area of dyiar-Al-hujjej, Tunisia. Water Supply 21: 24–45.

Eaton. F.M. (1944). Deficiency, toxicity and accumulation of boron in plants. Journal of Agricultural Research 69: 237–277.

Elsaid, K.; Kamil, M.; Sayed, E.T.; Abdelkareem, M.A.; Wilberforce, T.; Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. Science of The Total Environment 748: 141528, https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528

Gallego-Elvira, B.; Reca, J.; Martin-Gorriz, B.; Maestre-Valero, J.F.; Martínez-Álvarez, V. (2021). Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions. Agricultural Water Management 255: 107012, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107012

Goldberg, S. (1993). Chemistry and mineralogy of boron in soils. En Boron and Its Role in Crop Production. Ed. Gupta U.C. pp 344-364. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Grattan, S.R; Díaz, F.J.; Pedrero, F.; Vivaldi G.A. (2015) Assessing the suitability of saline wastewaters for irrigation of Citrus spp.: Emphasis on boron and specific-ion interactions. Agricultural Water Management 157: 48–58.

Gupta, U.C. (2007). Chapter 8, Boron. En Handbook of Plant Nutrition. Ed. Barker A.V. y Pilbeam D.J. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

Haas, A.R.C. (1929). Toxic effect of boron on fruit trees. Botanical Gazette 88: 113–131.

Herrera-León, S.; Cruz, C.; Kraslawski, A.; Cisternas, L.A. (2019). Current situation and major challenges of desalination in Chile, Desalination and Water Treatment, 171: 93–104.

Hipólito-Valencia, B.J.; Mosqueda-Jiménez, F.W.; Barajas-Fernández, J.; Ponce-Ortega, J.M. (2021). Incorporating a seawater desalination scheme in the optimal water use in agricultural activities. Agricultural Water Management 244: 106552, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020◦.106552

Hirich, A.; Choukr-Allah, R.; Rami, A.; El-Otmani, M. (2015). Feasibility of using desalination for irrigation in the Souss Massa Region in the South of Morocco. En Baawain (Ed.), Recent Progress in Desalination, Environmental and Marine Outfall Systems.

IDA (2020). Desalination and Water Reuse by the Numbers. International Desalination Association (IDA). https://idadesal.org/

Imbernón-Mulero, A; Gallego-Elvira, B.; Martínez-Álvarez, V.; Martin-Gorriz, B.; Molina-Del-toro, R.; Jodar-Conesa, F.J.; Maestre-Valero, J.F. (2022). Boron Removal from Desalinated Seawater for Irrigation with an On-Farm Reverse Osmosis System in Southeastern Spain. Agronomy 12: 611, https://doi.org/10.3390/agronomy12030611

Jame, Y.W.; Nicholaichuk, W.; Leyshon, A.J.; Campbell, C.A. (1982). Boron concentration in the soil solution under irrigation: a theoretical analysis. Canadian Journal of Soil Science 62: 461–471.

Jones, E.; Qadir, M.; Van Vliet, M.T.H.; Smakhtin, V.; Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. Science of the Total Environment, 657: 1343–1356.

Lahav, O.; Kochva, M.; Tarchitzky, J. (2010). Potential drawbacks associated with agricultural irrigation with treated wastewaters from desalinated water origin and possible remedies. Water Science and Technology 61: 2451–2460.

Lenntech (2022). Energy recovery turbochargers. https://www.lenntech.com/Data-sheets/ERI-AT-L.pdf#page=2cd

Mandal, U.K.; Bhardwaj, A.K.; Warrington, D.N.; Goldstein, D.; Tal, A.B.; Levy, G.J. (2008). Changes in soil hydraulic conductivity, runoff, and soil loss due to irrigation with different types of saline-sodic water. Geoderma 144: 509–516.

Martin-Gorriz, B.; Martínez-Álvarez,V.; Maestre-Valero, J.F.; Gallego-Elvira, B. (2021).Influence of the Water Source on the Carbon Footprint of Irrigated Agriculture: A Regional Study in South-Eastern Spain. Agronomy 11: 351, https://doi.org/10.3390/agronomy11020351

Martínez-Álvarez, V., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M. (2016). Seawater desalination for crop irrigation — A review of current experiences and revealed key issues. Desalination 381: 58–70.

Martínez-Álvarez, V.; González-Ortega, M.J.; Martin-Gorriz, B.; Soto-García, M.; Maestre-Valero, J. F. (2017). The use of desalinated seawater for crop irrigation in the Segura River basin (South-eastern Spain). Desalination 422: 153–164.

Martínez-Álvarez V.; Maestre-Valero J.F.; González-Ortega M.J.; Gallego-Elvira, V.; Martin-Gorriz B. (2019). Characterization of the Agricultural Supply of Desalinated Seawater in Southeastern Spain. Water 11: 1233, doi:10.3390/w11061233

Martínez-Álvarez, V., Gallego-Elvira, B., Maestre-Valero, J.F., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., 2020. Assessing concerns about fertigation costs with desalinated seawater in south-eastern Spain. Agricultural Water Management 239: 106257, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106257

Martínez-Álvarez, V.; Imbernón-Mulero, A.; Gallego-Elvira, B.; Soto-García, M.; Maestre-Valero, J.F. (2023a). Multidisciplinary assessment of the agricultural supply of desalinated seawater in south-eastern Spain. Desalination 548: 116252, https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116252

Martínez-Álvarez, V.; Imbernón-Mulero, A.; Maestre-Valero, J.F.; Ben Abdallah, S.; Gallego-Elvira, B. (2023b). Agronomic Analysis of the Replacement of Conventional Agricultural Water Supply by Desalinated Seawater as an Adaptive Strategy to Water Scarcity in South-Eastern Spain. Agronomy 13: 2878, https://doi.org/10.3390/agronomy13122878

Monterrey-Viña, A.; Musicki-Savic; A.; Díaz-Peña, F.J.; Peñate-Suárez, B. (2020). Technical and agronomical assessment of the use of desalinated seawater for coastal irrigation in an insular context. Water 12: 272, https://doi.org/10.3390/w12010272

Multsch, S.; Grabowski, D.; Lüdering, J.; Alquwaizany, A.S.; Lehnert, K.; Frede, H.-G.; Winker, P.; Breuer, L. (2017). A practical planning software program for desalination in agriculture - SPARE:WATERopt. Desalination 404: 121–131.

Navarro, J.M.; Antolinos, V.; Robles, J.M.; Botía, P. (2022). Citrus irrigation with desalinated seawater under a climate change scenario. Frontiers in Plant Science 13: 909083, https://doi.org/10.3389/fpls.2022.909083

Poseidon Water (2022). The Carlsbad Desalination Project. https://slideplayer.com/slide/9337829

Qin, Y.; Horvath, A. (2020). Use of alternative water sources in irrigation: potential scales, costs, and environmental impacts in California. Environmental Research Communications 2: 055003, https://doi.org/10.1088/2515-7620/ab915e

Reid, J.; Hayes, J.E.; Post, A.; Stangoulis, C.R.; Graham, D.R. (2004). A critical analysis of the causes of boron toxicity in plants. Plant, Cell and Environment 25: 1405–1414.

Russo, D.; Kurtzman, D. (2019). Using desalinated water for irrigation: its effect on field scale water flow and contaminant transport under cropped conditions. Water 11: 687, https://doi.org/10.3390/w11040687

UNESCO (2023). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: alianzas y cooperación por el agua. Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Yermiyahu, U.; Tal, A.; Ben-Gal, A.; Bar-Tal, A.; Tarchitzky, J.; Lahav, O. (2007). Rethinking desalinated water quality and agriculture. Science 318: 920–921.

Zarzo, D. 2017. Problemática y soluciones para la gestión y tratamiento de salmueras procedentes de desaladoras. Tesis doctoral. Universidad de Alicante.

Zolghadr-Asli, B.; McIntyre, N.; Djordjevic, S.; Farmani, R.; Pagliero, L. (2023). The sustainability of desalination as a remedy to the water crisis in the agriculture sector: An analysis from the climate-water-energy-food nexus perspective. Agricultural Water Management 286: 108407, https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108407

BLOQUE IV. OTRAS ESTRATEGIAS – FERTILIZACIÓN, TRATAMIENTOS FITOSANITARIOS Y MATERIAL VEGETAL

4.1. Estrategias para una fertirrigación sostenible de los cítricos

Belén Martínez-Alcántara, Ana Pérez-Piqueres, Isabel Rodríguez, Julia Morales-Alfaro y Ana Quiñones *

Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible. Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)

* quinones_ana@fqva.es

Índice

1. Modernización del riego para la sostenibilidad agrícola 318
2. Importancia del fertirriego en el cultivo de los cítricos 319
3. Prácticas eficientes del manejo del fertirriego 320
4. Aprovechamiento de la precipitación efectiva como aporte de agua a los cultivos 321
5. Estrategias de mejora de la gestión del uso del agua en los cítricos 322
   5.1. Desarrollo experimental 322
   5.2. Programación del fertirriego 323
   5.3. Tratamientos realizados 324
   5.4. Muestreos y métodos analíticos 325
   5.5. Análisis estadístico 326
6. Ahorro de agua a través de las estrategias de gestión del riego 326
7. Efecto del manejo sobre la cosecha y productividad del agua de riego 328
8. Efecto del manejo sobre las características físico y químicas de calidad del fruto 330
9. Impacto de las técnicas de fertirriego sobre el estado nutricional de las plantas 333
10. Estrategias para una fertirrigación sostenible de los cítricos 334
11. Conclusiones y perspectivas futuras 337

Resumen

El riego y la fertilización son factores clave que influyen en gran medida en los costes de producción, la calidad de la fruta y los rendimientos del cultivo. La modernización de las estrategias de riego ha permitido reducir el uso del agua y mejorar el control de la aplicación tanto del agua de riego como de los fertilizantes por parte de los agricultores. En los cítricos, cultivo emblemático en la Comunidad Valenciana, los esfuerzos deben dirigirse no solo a la implantación de sistemas de riego alternativos sino, también, al desarrollo de estrategias de manejo que permitan reducir la dosis de agua manteniendo el máximo desarrollo de los cultivos sin afectar a la cosecha ni a la calidad del fruto. Además, el empleo de coeficientes de

aprovechamiento del agua de lluvia para el cálculo de las dosis de riego puede reducir, aún más, el volumen de agua aplicado. Los resultados de ensayos realizados desde el CDAS-IVIA permiten concluir que el empleo de riego a goteo subterráneo junto con déficit hídrico del 70 % ETc, desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo, considerando el 100 % de la superficie de copa, para el cálculo del aprovechamiento de la precipitación, dio lugar a árboles con una producción similar a la obtenida sin restricción consiguiendo un ahorro de agua de riego cercana al 60 % y una productividad del uso de agua del 13 $kg \cdot m^{-3}$.

1. Modernización del riego para la sostenibilidad agrícola

El Pacto Verde Europeo, presentado por la Comisión Europea en diciembre de 2019, establece una ambiciosa hoja de ruta para conseguir en la Unión Europea una economía sostenible y climáticamente neutra para el año 2050 (Comisión europea, 2019). Una de las piedras angulares del Pacto Verde Europeo es la *Estrategia de la Granja a la Mesa* (Comisión europea, 2020), que busca abordar los desafíos urgentes relacionados con la seguridad alimentaria, la sostenibilidad ambiental y la salud pública. Esta estrategia tiene como objetivo principal promover sistemas alimentarios justos, saludables y respetuosos con el medio ambiente, reduciendo la huella ambiental de la producción y consumo de alimentos, y fomentando prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes. Así, la actual política agraria común (PAC) adquiere el compromiso de transformar el modelo agroalimentario mediante la reducción de los recursos empleados en la producción agrícola (agua, nutrientes y suelo) a través del desarrollo de estrategias más eficientes.

En este contexto, la *Directiva Marco del Agua* (DMA) de la Unión Europea (UE, 2000) desempeña un papel crucial al establecer un marco legislativo integral para la protección y gestión sostenible de los recursos hídricos en Europa. La DMA establece objetivos ambiciosos para lograr un buen estado ecológico de las aguas superficiales y subterráneas en toda la Unión Europea para el año 2027, así como para promover la utilización sostenible del agua y la protección de los ecosistemas acuáticos.

La interconexión entre el Pacto Verde Europeo, la *Estrategia de la Granja a la Mesa* y la *Directiva Marco del Agua* es evidente en su enfoque común hacia la protección del medio ambiente y la salud humana, y ofrece un marco integral para la transformación del sistema agroalimentario europeo hacia la sostenibilidad y la resiliencia. Así, se reconoce la necesidad de implementar prácticas agrícolas más sostenibles y eficientes. Dentro de estas técnicas, el desarrollo de pautas de fertirriego emerge como una herramienta fundamental para alcanzar estos objetivos, ya que la agricultura es uno de los principales consumidores de recursos hídricos representando más del 70 % del uso mundial de agua dulce (Dalin *et al.*, 2019).

Por otro lado, el riego y la fertilización son factores clave que influyen en gran medida en los costes de producción, la calidad de la fruta y los rendimientos del cultivo. El fertirriego combina la fertilización y el riego en una sola aplicación, lo que permite un uso más eficiente tanto del agua de riego como de los fertilizantes aportados (Thomson *et al.*, 2018). La importancia del fertirriego radica en su capacidad para proporcionar a las plantas los nutrientes necesarios de

manera precisa y en el momento adecuado, minimizando así la pérdida de nutrientes por lixiviación y reduciendo la contaminación del agua. De este modo, tanto el riego como la fertilización se han convertido en piezas clave de la producción agrícola actual y el desarrollo rural en España. En las últimas décadas se ha destinado un gran esfuerzo en la modernización de los sistemas de riego. Así, la agricultura de regadío representa el 14 % de la superficie agrícola útil, en cambio proporciona el 50 % de la producción vegetal final española (MAPA, 2021). La reforma de los sistemas de riego en España y, por ende, en la Comunidad Valenciana, ha supuesto el cambio de redes de canales abiertos para riego superficial a redes de tuberías presurizadas y sistemas de riego por goteo en los que se aplican los fertilizantes (Sanchis-Ibor *et al.* 2021). Esta modernización ha permitido reducir el uso del agua de riego y mejorar el control de la aplicación tanto del agua como de los fertilizantes por parte de los agricultores (Berbel *et al.* 2019).

2. Importancia del fertirriego en el cultivo de los cítricos

El cultivo de los cítricos representa uno de los principales sectores frutícolas a escala mundial. Su producción se cifra en 152 Mt (MAPA, 2023). China lidera la producción mundial (44.6 Mt), seguida de Brasil (19.4 Mt), India (13.9 Mt), México (8.8 Mt) y EE. UU. (7,2 Mt). España, con una superficie de más de 300 $\cdot 10^6$ ha en 2022 y una producción media de 6,85 Mt, se configura como el sexto país productor del mundo y el primero de la UE (60 % producción mediterránea). En cuanto a la exportación citrícola, España es el principal exportador mundial de cítricos frescos, representando el 25 % del total mundial. Casi el 60 % de la producción citrícola española se destina al mercado exterior, siendo del 65 % en el caso de las mandarinas y superando el 80 % en el pomelo (MAPA, 2022). A nivel nacional, la Comunidad Valenciana (CV) es la principal región citrícola con una superficie dedicada a este cultivo de 154.157 ha, que suponen cerca del 60 % del total nacional según la campaña 2022/2023. La mitad de la producción se corresponde con naranjas (48,7 % con 1.416 Mt), el 42,3 % mandarinas (1.229 Mt), el 8,4 % limones (243 Mt) y el 0,6 % restante pomelos y otros cítricos (CAGP-GVA, 2023).

En la actualidad, la confluencia del cambio climático, la urbanización, la industrialización, una población mundial en crecimiento y una mayor demanda de agua para otros sectores ha llevado a prácticas generalizadas de riego que operan en condiciones de escasez hídrica (Al-Ghobari y Dewidar, 2018). Esta situación es una de las principales limitaciones en regiones áridas y semiáridas, como ocurre en la producción de cítricos en la zona del Mediterráneo, donde el desarrollo y la producción de las plantas de cítricos se han visto limitados, en algunos casos, por la escasez de este recurso. En este contexto, es esencial desarrollar estrategias específicas de fertirrigación económica y ambientalmente sostenibles que incrementen la eficiencia de uso del agua (EUA).

En la CV, las precipitaciones son escasas e irregulares, por lo que son, aún más, necesarias recomendaciones óptimas de riego para cubrir las necesidades hídricas de los cítricos, que oscilan entre 400 y 600 mm por año (RiegosIVIA, 2024). Actualmente, el riego por goteo es el principal sistema utilizado en cítricos en España, ya que casi el 84 % de la superficie cultivada de este cultivo se riega mediante este sistema (MAPA, 2023). Y en la CV, este cultivo destaca por la implantación casi completa de sistemas eficientes de riego, el 92 % de la superficie cultivada

(ESYRCE, 2023). Por tanto, los esfuerzos deben dirigirse no solo a la implantación de sistema de riego alternativos sino, también, al desarrollo de estrategias de manejo del riego que permitan reducir las dosis de agua manteniendo el máximo desarrollo de los cultivos sin afectar a la cosecha ni a la calidad del fruto.

3. Prácticas eficientes del manejo del fertirriego

Como se ha indicado, la demanda de suelo y agua ha aumentado significativamente, y se espera que estos recursos sean todavía más escasos en el futuro. En este contexto, la agricultura es el mayor consumidor de agua. Por lo tanto, promover la eficiencia en el uso agrícola del agua ha de ser un enfoque fundamental para aliviar la escasez de agua debido a las diferencias regionales en la dotación de recursos hídricos (Xu et al, 2021).

En respuesta a este desafío, y tras la completa implantación de riego a goteo, el **riego por goteo subterráneo** (RGS) se plantea como estrategia para incrementar la eficiencia de uso del agua, lo que permitiría reducir, aún más, el consumo de esta (El-Attar *et al.* 2019). Este sistema se define como la aplicación de agua debajo de la superficie del suelo a través de tuberías y/o emisores subterráneos que aportan caudales de agua similares al riego por goteo superficial (ASAE, 2001). Actualmente el RGS está experimentando una importante expansión debido a sus numerosas ventajas frente al riego por goteo superficial (Volschenk, 2020):

- Permite la aplicación de pequeñas cantidades de agua y fertilizantes directamente en la zona radicular de los cultivos, con una elevada frecuencia para mantener adecuadas condiciones de humedad y nutrición en las raíces. Esto origina una disminución de la evapotranspiración del cultivo, dando lugar a una mayor eficiencia del riego y la fertilización.
- Origina incrementos tanto en el rendimiento como en la calidad de los frutos, lo que reduce los costes de producción.
- Aumenta el volumen de suelo húmedo, lo que, en algunos cultivos, lleva asociado un mayor desarrollo radicular.
- A nivel de parcela, disminuye la presencia de malas hierbas y facilita las operaciones en el suelo, lo que conlleva a instalaciones más duraderas.
- Reduce el riesgo de enfermedades foliares, ya que la parte aérea del árbol permanece seca.

Aunque son evidentes las ventajas del RGS, también presenta algunos inconvenientes (Rodriguez-Sinobas & Gil-Rodríguez, 2012) que se han ido corrigiendo a medida que el sistema se ha ido implantando. Entre las más importantes, destaca el alto coste inicial de instalación, las posibles fugas causadas por roedores y la dificultad de las reparaciones, que pueden ser complejas o difíciles de localizar, particularmente en RGS más profundos. Por otro lado, las líneas de goteo deben ser monitoreadas para detectar posibles averías, y los procedimientos operativos y de diseño del sistema deben emplear salvaguardas para limitar o prevenir una mayor intrusión de las raíces. Por ello, las líneas de goteo necesitan ser limpiadas, periódicamente, para eliminar precipitados que pueden ocurrir en las laterales. Por ello, la

operación y la gestión requieren una supervisión más constante que algunos sistemas de riego alternativos. (Martínez-Gimeno *et al.*, 2018).

El **riego deficitario** (RD) se ha convertido en otra técnica de ahorro de agua que consiste en suministrar una dosis de riego inferior a las necesidades hídricas máximas de la planta (García-Tejero, 2010). Se ha observado que la respuesta de las plantas al estrés hídrico inducido por la RD varía con las etapas de crecimiento. Reducir el volumen de riego aplicado en etapas no críticas, aunque puede reducir el crecimiento normal de la planta, puede no producir, necesariamente, un impacto negativo significativo en la productividad (Appiah *et al.,* 2021). Esencialmente, existen dos métodos para originar un déficit hídrico en los cultivos, reduciendo la cantidad de agua o incrementando el período entre ciclos de riego.

Con respecto a la reducción de la cantidad de agua aportada, el **riego deficitario controlado** (RDC) se define como el aporte de agua de riego para satisfacer la evapotranspiración (ET) total de la planta en etapas críticas de crecimiento y la reducción en las etapas no críticas, principalmente cuando el desarrollo de frutos es mínimo (Chai *et al.* 2016). Para aplicar este enfoque de manera efectiva, es necesario predeterminar las etapas críticas de crecimiento para una especie y variedad de cultivo específicas, y evaluar su sensibilidad relativa al déficit hídrico en varias etapas del ciclo de vida. La sensibilidad puede verse afectada por muchos factores, incluidas las condiciones climáticas, las especies y variedades de cultivos y las prácticas de manejo agronómico, entre otros. Dentro de una especie, los genotipos difieren en la tasa de fotosíntesis, la conductancia estomática y la tasa de transpiración, expresando así diferentes grados de respuestas al estrés hídrico. El efecto del déficit hídrico en la planta puede, también, verse afectado por las prácticas agronómicas, como el uso de cubiertas vegetales.

Finalmente, merece la pena destacar que esta estrategia de reducción del aporte del agua de riego, además de producir beneficios económicos por el ahorro hídrico, ocasiona un impacto positivo sobre la calidad medioambiental ya que, junto con una racionalización en el uso de pesticidas y fertilizantes, se puede reducir la contaminación de aguas subterráneas.

4. Aprovechamiento de la precipitación efectiva como aporte de agua a los cultivos

La mayoría de las recomendaciones de riego se basan, principalmente, en cubrir las necesidades de evapotranspiración de los cultivos, sin tener en cuenta el agua aportada por la lluvia. Sin embargo, la disminución de los recursos hídricos y de los niveles de precipitación ha requerido de ajustes para abordar las necesidades reales no cubiertas por la, denominada, precipitación efectiva (P_e), con el fin de optimizar las dosis de riego.

En este marco, las precipitaciones son un recurso hídrico que se ha de tener en cuenta para el desarrollo de los cultivos. Sin embargo, no toda la lluvia puede ser aprovechada por los mismos debido a las pérdidas que se producen cuando el agua de lluvia cae sobre la superficie del suelo. Esto significa que no toda la lluvia que se infiltra en el suelo es absorbida por los cultivos, ya que una parte del agua se evapora de la superficie, otra se infiltra hacia capas más profundas o se convierte en escorrentía superficial. Así, la P_e es la cantidad de agua de lluvia que realmente se almacena en la zona radicular y está disponible para los cultivos (Marković *et al.*, 2021). Esta fracción es la componente que debe de ser tenida en cuenta en la programación del riego. Bos

et al. (2009) declararon que la P_e es la fracción de la precipitación total que reemplaza, o potencialmente reduce, una cantidad neta correspondiente de agua de riego.

En cultivos leñosos, los factores que influyen en la parte que es efectiva incluyen el clima (temperatura, humedad, viento, etc.), la textura y estructura del suelo (capacidad de almacenamiento de agua), la pendiente del terreno y la intensidad y duración de la tormenta, además de características del cultivo como la profundidad de la zona radicular o la copa de las plantas. La lluvia efectiva depende, también, del estado anterior de humedad del suelo. Si llueve justo después de un riego, la cantidad máxima de esa precipitación será no efectiva. Así, en la directriz FAO-25 (Dastane, 1974) no se consideran lluvias eficaces aquellas de intensidad menor de 5 mm (durante el período seco), ya que esta cantidad de precipitación probablemente se evaporaría de la superficie antes de lixiviarse en el perfil del suelo. Por otro lado, las lluvias menos efectivas son las lluvias intensas que, si bien constituyen un rendimiento relativamente grande en el balance climático, son menos efectivas al filtrarse gran parte del agua fuera del alcance del sistema radicular o perderse por escorrentía superficial.

Por tanto, a la hora de analizar las necesidades hídricas, el factor que se debe considerar no es la cantidad de precipitación sino la cantidad de P_e (precipitación efectiva) que es aprovechado por el cultivo (E: eficiencia de uso de la precipitación). Dado que apenas existe información sobre el aprovechamiento de las lluvias por los cultivos, posiblemente debido a la dificultad de evaluación de todos los parámetros mencionados que influyen en su cálculo, es necesario implementar diferentes métodos de cálculo para la estimación de esa ratio (E). Algunos autores aplican coeficientes de corrección en función de los eventos de lluvia anteriores y de su intensidad o de la capacidad de retención de agua del suelo, entre otros (Rahman *et al.,* 2008; Adnan y Khan, 2011).

5. Estrategias de mejora de la gestión del uso del agua en los cítricos

El riego a goteo subterráneo, así como estrategias de déficit hídrico han sido ampliamente estudiados en cultivos hortícolas como prácticas de ahorro de agua de riego, en cambio, la información disponible sobre su aplicación combinada en árboles frutales es limitada. En este capítulo se expondrán las mejores prácticas y tecnologías disponibles para una fertirrigación sostenible de los cítricos, abordando los desafíos y oportunidades que, la implementación de sistemas de fertirrigación eficientes y respetuosos con el medio ambiente, presentan en el contexto actual.

Para ello se evaluará la repercusión de estrategias de RGS, y RDC que integren la Pe, sobre el volumen de agua aportado, la eficiencia de su uso por el cultivo, así como su efecto sobre la ionómica foliar, la producción y calidad de fruto y la eficiencia de absorción de los nutrientes.

5.1. Desarrollo experimental

El ensayo se ha llevado a cabo, durante cuatro campañas consecutivas, en una parcela comercial, situada en Puzol (Valencia), de la variedad clementina de Nules (*Citrus* clementina, Hort. ex Tan.) injertada sobre *citrange* carrizo (*Citrus sinensis*, Obs. x *Poncirus trifoliata*, Raf), con un marco de plantación de 3,5 x 5,6 m (510 árboles·ha^{-1}).

Figura 1. Parcela experimental de clementina de Nules localizada en Puzol (Valencia). Detalle de las ventosas del riego subterráneo

El suelo, de textura franco-arcillosa (62,6 % arena, 19,2 % limo, 18,2 % arcilla), bajo contenido de materia orgánica (0,90-1,03 %), pH 8,2, presentaba una densidad aparente de 1,6 kg·m^{-3}, con una capacidad de retención de agua del 14,8 %, un coeficiente de marchitamiento de 5,6 % y una capacidad útil de retención de 9,2 %.

El ensayo se ha desarrollado bajo condiciones mediterráneas secas, con una evapotranspiración potencial promedio (ET_0) cercana a 1.500 mm·año^{-1}, y precipitación anual entre 250 y 500 mm·año^{-1}, con una alta variabilidad mensual distribuida principalmente de octubre a mayo. La amplitud térmica es amplia, con temperaturas suaves en invierno, rara vez inferiores 0 °C, y condiciones severas en verano, con temperaturas que en muchos casos superan los 40°C. Estas condiciones ambientales promueven un déficit hídrico promedio anual de alrededor de 1.000 milímetros. Para cubrirlas, la parcela se riega con agua de pozo de conductividad eléctrica 2,1 mS·cm^{-1}, [nitratos] 250-280 mg·L^{-1} y altas concentraciones de calcio y magnesio (210 y 100 mg·L^{-1}, respectivamente).

Para el cálculo de las dosis de abonado y su distribución estacional se siguieron los criterios establecidos por Quiñones *et al.* (2007) y Legaz *et al*. (2008) en cítricos para riego a goteo de acuerdo con su diámetro de copa que al inicio del ensayo fue de 3,10 m. El nitrógeno (N), no aportado por el agua de riego, se suministró como nitrato amónico y nitrato potásico; el fósforo (P) se aplicó en forma de ácido fosfórico y el hierro (Fe) como EDDHA. El resto de los micronutrientes se aportaron con un quelato múltiple.

5.2. Programación del fertirriego

La dosis de riego (DR) se calculó, por tanto, mediante la ecuación 1:

$$DR\ (mm) = ET_c - P_e \quad \text{(Ec.1)}$$

Siendo DR: volumen de agua de riego requerido; ET_c: evapotranspiración del cultivo (mm); P_e: la precipitación efectiva (mm).

La evapotranspiración total del cultivo (ET_c) se obtiene mediante la ecuación 2:

$$ET_c(mm) = \frac{ET_0(mm)}{K_c} \quad \text{(Ec.2)}$$

Donde ET_0 es la evapotranspiración del cultivo de referencia en condiciones estándar y Kc es el coeficiente de cultivo. Este coeficiente (K_c por mes) tiene en cuenta los factores específicos del cultivo sobre las necesidades de agua y es función del tamaño de copa y de las características de las hojas, principales órganos vegetales de transpiración (Tabla 1). Los valores de ET_0 se determinaron utilizando la propuesta de Penman-Monteith (Allen *et al.* 1998) a través de los datos de la estación meteorológica más cercana a la parcela.

Tabla 1. Coeficiente de cultivo mensual (K_c)

Mes	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Factor	0,97	0,96	0,97	0,91	0,81	0,91	1,00	1,16	1,09	1,24	1,07	0,93
K_c mes*	0,505	0,500	0,505	0,474	0,422	0,474	0,521	0,604	0,567	0,646	0,557	0,484

**K_c mes = K_c medio x Factor = [0,274 +(0.005+PAS)] x Factor; PAS: porcentaje área sombreada al inicio del ensayo (49,4 %).*

La precipitación anual, registrada como la media de tres pluviómetros colocados en diferentes puntos de la parcela, supuso 516, 463, 472 y 392 mm·año^{-1} en las campañas evaluadas.

Las necesidades de agua de riego cubiertas por la precipitación (precipitación útil) se calcularon según la ecuación 3:

$$P_u(m^3 \cdot árbol^{-1}) = AC(m^2) \times P_e(L \cdot m^{-2}) \times F \times 0{,}001(L \cdot m^{-3}) \quad \text{(Ec.3)}$$

Donde AC es el área de la copa del árbol al inicio de cada ciclo de cultivo; P_e es la precipitación efectiva correspondiente a lluvias superiores a 5 mm y menores de 45 mm (cantidad que satura el perfil del suelo, perdiéndose el agua hacia zonas fuera del sistema radicular absorbente) y F es el factor que representa el porcentaje de lluvia que se considera aprovechado por los cítricos en función del área de copa. El valor de 45 mm se obtuvo a partir de la densidad aparente, la capacidad de retención de agua del suelo y la profundidad máxima de desarrollo de las raíces absorbentes.

La mitad de la parcela se regó por riego a goteo superficial (RG) y, la otra mitad, con riego por goteo subterráneo (RGS) situado a 30 cm de profundidad. En ambos sistemas de riego se colocaron 2 líneas porta-goteros, por cada fila de árboles, a una distancia de 100 cm del tronco. Cada árbol dispuso de 8 emisores autocompensantes con un caudal de 4 L·hora^{-1}, separados alrededor de 80 cm. La frecuencia de riego varió de 0 a 3 veces por semana de acuerdo con la evapotranspiración y la lluvia efectiva. Las dosis de fertilizantes se aplicaron simultáneamente con el riego por medio de 2 bombas inyectoras eléctricas.

5.3. Tratamientos realizados

Se evaluaron tres factores: sistema de riego (goteo superficial (RG) y subterráneo (RGS), déficit de riego (100, 100-70, 100-100/40 % ETc) y aprovechamiento de la precipitación efectiva (50-100 %).

Las estrategias de riego deficitario fueron las siguientes:

- RC_{100}: riego convencional donde se aportó el 100 % las necesidades hídricas, calculadas a través de la ETc, durante todo el ciclo vegetativo.
- RDC_{70}: riego deficitario controlado con la aplicación del 100 % ETc desde el inicio de la brotación-floración de primavera (marzo) hasta el cuajado del fruto (principio de julio)

y del 70 % Etc desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo.

- $RDC_{100/40}$: riego deficitario controlado con riegos que cubren el 100 % ETc desde el inicio de la brotación-floración de primavera (marzo) hasta el cuajado del fruto (principio de julio) y riegos alternativos con el 40 o 100 % ETc desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo.

Para el cálculo de la proporción de la precipitación utilizada por las plantas (P_e) se emplearon, arbitrariamente, dos coeficientes de precipitación efectiva correspondiente al 50 y 100 % del área de copa:

- Pu_{50}: se aprovecha el 50 % de la superficie de la copa.
- Pu_{100}: se aprovecha el 100 % de la superficie de la copa.

Las combinaciones de estos factores dieron lugar en doce tratamientos distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones cada una de 18 árboles (Tabla 2), con seis estrategias de riego para ambos sistemas de riego (RG y RGS).

Tabla 2. Estrategias de riego realizadas durante cuatro campañas consecutivas.

Tratamiento	Sistema riego	% ETc	% P_e (P_u)
RG_{100-50}	RG	RC (100)	50
RGS_{100-50}	RGS	RC (100)	50
RG_{70-50}	RG	RDC_{70} (100-70)	50
RGS_{70-50}	RGS	RDC_{70} (100-70)	50
$RG_{100/40-50}$	RG	$RDC_{100/40}$ (100-100/40)	50
$RGS_{100/40-50}$	RGS	$RDC_{100/40}$ (100-100/40)	50
$RG_{100-100}$	RG	RC (100)	100
$RGS_{100-100}$	RGS	RC (100)	100
RG_{70-100}	RG	RDC_{70} (100-70)	100
RGS_{70-100}	RGS	RDC_{70} (100-70)	100
$RG_{100/40-100}$	RG	$RDC_{100/40}$ (100-100/40)	100
$RGS_{100/40-100}$	RGS	$RDC_{100/40}$ (100-100/40)	100

5.4. Muestreos y métodos analíticos

Para conocer el estado nutritivo del arbolado, se analizó la ionómica foliar de hojas seleccionadas al azar de la brotación-floración de primavera sin fruto terminal (alrededor de 10 hojas por árbol) en noviembre de cada año. Posteriormente, las muestras se congelaron en nitrógeno líquido y se liofilizaron. Las muestras se molieron con un molino refrigerado por agua y luego se tamizaron a través de un tamiz de malla de 0,3 mm y se almacenaron a -20 °C para su posterior análisis.

El nitrógeno (N) se determinó utilizando un analizador elemental (NC2500 Thermo Finnigan, Bremen, Alemania). El resto de macronutrientes se midieron mediante espectrometría de emisión simultánea con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (iCAP-AES 6000, Thermo Scientific. Cambridge, Reino Unido).

En el momento de la recolección se controló la producción y se tomó una muestra representativa de cuarenta frutos al azar por réplica (cinco frutos por árbol de ocho árboles por réplica), se pesaron y se analizaron los parámetros físicos y químicos de calidad de la fruta (peso

y diámetro del fruto, espesor de corteza, porcentaje de corteza y zumo, sólidos solubles totales, acidez total e índice de color). El número de frutos se obtuvo utilizando la relación entre el rendimiento y el peso promedio de los frutos individuales. El peso del fruto, así como, el porcentaje de corteza y zumo se determinaron gravimétricamente. El diámetro ecuatorial de la fruta se midió, individualmente, utilizando un calibrador digital (Mitutoyo CD-15D, Japón). El contenido de sólidos solubles totales (SST) del zumo (°Brix) se midió utilizando un refractómetro digital (Atago PR-101 Alfa, Tokio, Japón) y la acidez total (AT) se evaluó mediante titulación con NaOH 0,1 N, utilizando fenolftaleína como indicador. Se obtuvo la relación entre SST y AT, comúnmente llamada índice de madurez (IM). El índice de color (IC) se midió tomando tres lecturas alrededor de la superficie ecuatorial de cada fruto usando un Minolta Chroma Meter CR-300 (Minolta Camera Co. Ltd., Osaka, Japón). Los resultados se dan en la escala de colores de Hunter Lab. Este sistema se basa en las mediciones L, a y b. Los valores L representan luz desde cero (negro) hasta 100. (blanco). Los valores de a cambian de –a (verde) a +a (rojo), mientras que el valor b es de –b (azul) a +b (amarillento). A partir de los valores L, a y b se calcula una relación de 1000·a/L·b para dar el índice de color de los cítricos (Ladaniya, 2008).

Además, el efecto de los diferentes tratamientos sobre la eficiencia de uso del agua se determinó teniendo en cuenta el agua aplicada, mediante la relación entre el rendimiento del cultivo (kg) y el agua total aplicada ($L \cdot m^{-2}$):

$$EUA(kg \cdot m^{-3}) = \frac{Producción\ (Kg)}{DR\ (mm)} \quad \text{(Ec. 4)}$$

5.5. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para ver la influencia de los distintos factores empleados (sistema de riego, % ETc y P_u) sobre los parámetros indicados anteriormente. Las diferencias entre medias se determinaron por medio del test LSD-Fisher.

6. Ahorro de agua a través de las estrategias de gestión del riego

La figura 2 muestra las necesidades de evapotranspiración del cultivo de cada uno de los tratamientos cubiertas tanto por la precipitación útil como por el riego, situándose entre 5000 y 6000 mm por año, con el mayor valor durante la cuarta campañas (C4).

El ahorro de agua debido al diferente aprovechamiento teórico de la precipitación efectiva (P_e), así como al déficit hídrico se muestra en la Tabla 3. En cuanto al porcentaje de uso efectivo de la precipitación (50 o 100 % AC), la reducción en el agua de riego aportada fue significativamente mayor cuando se consideraba un área de copa del 100 % (alrededor del 40 %) que para el 50 % (alrededor del 20 %) en todas las campañas con respecto a no considerar la precipitación en el cálculo de las dosis de riego.

En cuanto a las estrategias de riego deficitario (RDC), la reducción de cubrir el 100 % de la ETc al 70 % o riegos alternativos del 100/40 % ETc permitió un ahorro del agua de riego (EUR) de casi un 20 %, sin diferencias significativas entre estas estrategias.

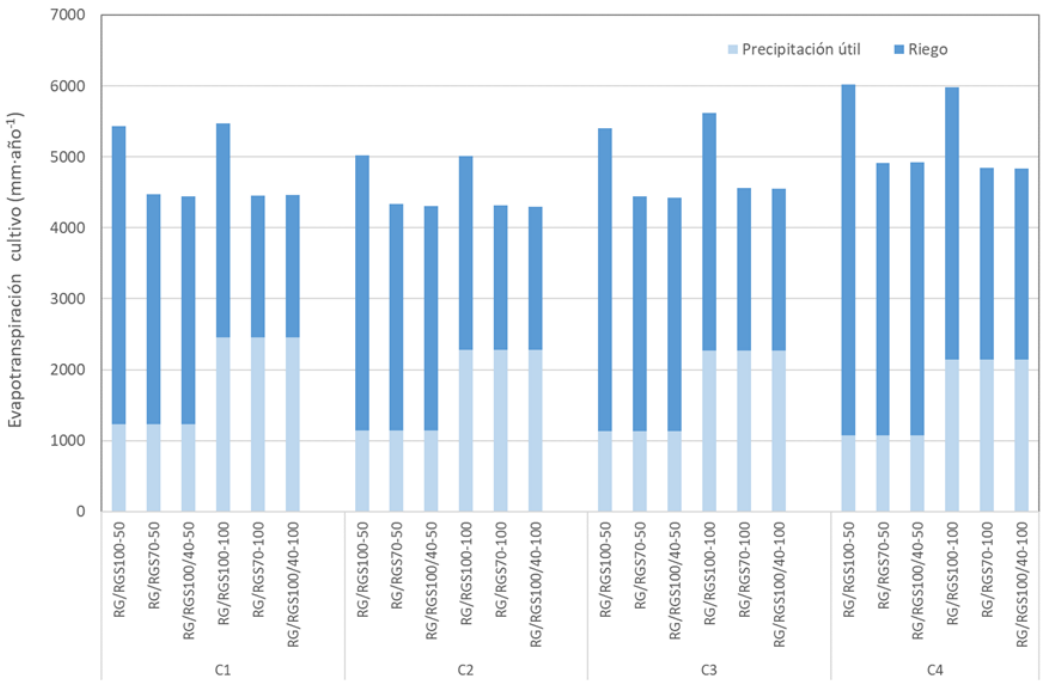


Figura 2. Evapotranspiración anual cubierta por la precipitación útil y el riego

Tabla 3. Ahorro en el consumo del agua debido a las diferentes estrategias de riego

Campaña	**1**		**2**		**3**		**4**	
Tratamiento	EUP[1]	EUR[2]	EUP	EUR	EUP	EUR	EUP	EUR
RG/RGS$_{100-50}$	22,64a		22,73a		21,03a		17,80a	
RG/RGS$_{70-50}$	22,64a	17,65	22,73a	13,71	21,03a	17,75	17,80a	18,32
RG/RGS$_{100/40-50}$	22,64a	18,13	22,73a	14,20	21,03a	18,03	17,80a	18,28
RG/RGS$_{100-100}$	44,96b		45,55b		40,41b		35,84b	
RG/RGS$_{70-100}$	44,96b	18,57	45,55b	13,89	40,41b	18,78	35,84b	18,95
RG/RGS$_{100/40-100}$	44,96b	18,33	45,55b	14,14	40,41b	19,00	35,84b	19,1
ANOVA[3]	*	ns	*	ns	*	ns	*	ns

[1]EUPRG/RGS (%): Ahorro en el uso del agua debida a la precipitación = (ET_{ci-i} x DR_{i-i})x100/ET_{ci-i}
[2]EUR (%): Eficiencia uso del agua debido a las estrategias de riego deficitario = (ET_{c100-i}- ETc_{i-i})x100/ET_{c100-i}
[3]ANOVA (por campaña): factor significativo para $p \leq 0,05$ (*), ns no significativo. Letras diferentes indican efecto del aprovechamiento de la precipitación efectiva o del déficit hídrico realizado.

El ahorro promedio de las cuatro campañas se muestra en la figura 3, con diferencias significativas entre estrategias. Así, el menor ahorro, cercano al 20 %, se obtiene en ambos sistemas de riego (RG y RGS) con el 50 % AC de aprovechamiento de la P_e y sin estrategias de riego deficitario. Considerando este aprovechamiento del agua de lluvia (50 % AC) pero con déficit hídrico (70 y 100/40 % Etc) se consiguieron ahorros significativamente superiores y similares (en torno al 40 %) a los tratamientos RG/RGS100-100. Sin embargo, la mayor reducción de agua de riego (casi un 60 %) se logró con las estrategias de déficit hídrico y el P_u del 100 % AC, sin diferencias significativas entre ambas.

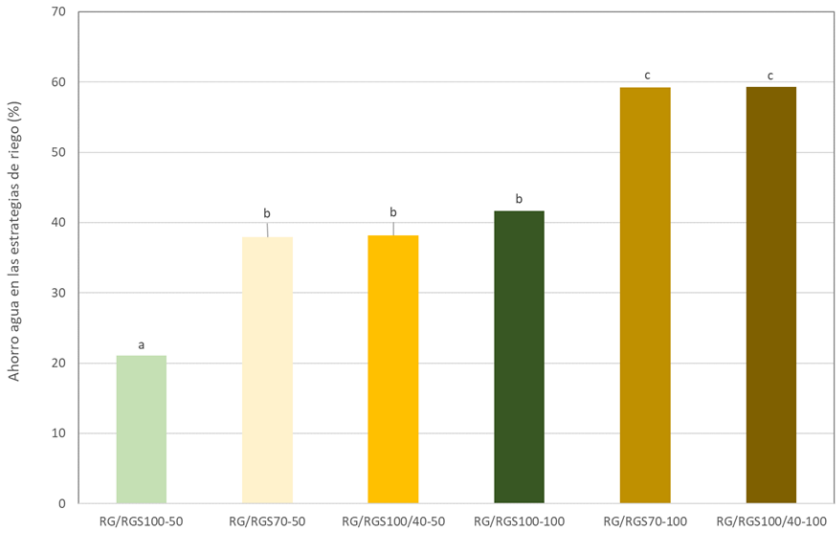


Figura 3. Ahorro en el consumo de agua de riego promedio durante las cuatro campañas de estudio. ANOVA (por campaña): diferencias entre tratamientos. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente ($p \leq 0,05$)

7. Efecto del manejo sobre la cosecha y productividad del agua de riego

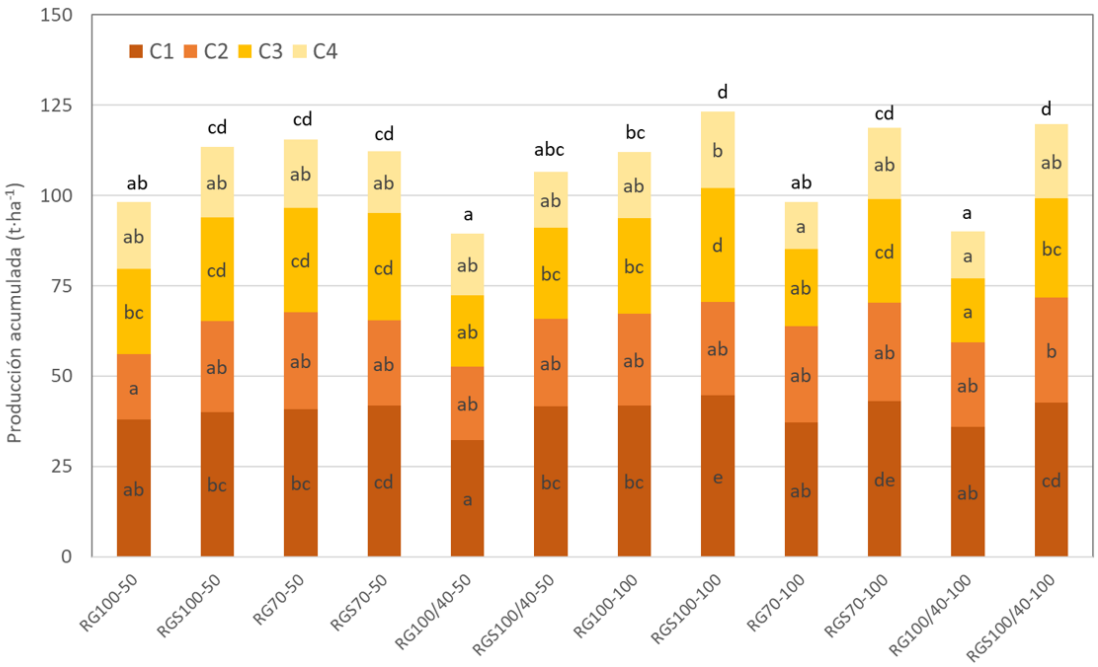
La producción (figura 4), al igual que la productividad del uso del agua ($kg \cdot m^3$) (figura 5), fue significativamente diferente en cada una de las campañas con un evidente patrón de alternancia de los árboles durante el ensayo, con años de alta producción ("año ON") seguidos de años de baja ("año OFF"). Los tratamientos empleados en la gestión del riego no afectaron a esta alternancia encontrándonos, de forma generalizada, con altas producciones en la primera y tercera campaña y menores cosechas en la segunda y cuarta (Figura 4).

La estrategia de riego que dio lugar a una mayor producción fue RGS100-100, con una mayor cosecha tanto en 3 de las campañas evaluadas (C1, C3 y C4) como en la acumulada en los años de estudio, sin diferencias significativas con los árboles regados con RGS100-50, RG/RGS70-50 y RGS100/40-100, con excepción de la producción de la C1 y con el tratamiento RGS70-100. Por el contrario, las plantas regadas mediante RG100/40 con los dos coeficientes teóricos de aprovechamiento de la P_e tuvieron una cosecha significativamente inferior.

El sistema de riego (SR: RG/RGS) afectó significativamente a la producción de los años ON y en la producción acumulada, siendo superior en los árboles regados con riego a goteo subterráneo (RGS), originado por frutos significativamente de mayor peso en C1 (Tabla 4) o por un mayor número de frutos en C3 (Tabla 6).

Igualmente, los riegos deficitarios afectaron significativamente a la producción de las campañas ON y de la producción acumulada. Así, la estrategia de riego deficitario donde se realizaron riegos alternos con el 40 o 100 % ETc desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo dio lugar a una producción significativamente inferior a los tratamientos de aporte del 100 % ETc.

Por el contrario, no se observaron diferencias significativas en este parámetro en la producción obtenida debido a las estrategias de aprovechamiento de la precipitación realizadas.



ANOVA	C1	C2	C3	C4	C1-C4
SR	***	ns	**	ns	***
Etc	*	ns	*	ns	*
Pu	ns	ns	ns	ns	ns

Figura 4. Producción anual acumulada a lo largo de las cuatro campañas de ensayo. ANOVA (por campaña): diferencias entre tratamientos. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente ($p \leq 0,05$) SR: Sistema de riego; ETc: Evapotranspiración cultivo; Pu: precipitación útil

Otro parámetro, además del ahorro del agua, para evaluar la eficiencia de las estrategias realizadas es el parámetro de productividad del uso del agua (PA), ratio entre la producción por árbol y el volumen de agua realmente aportada por el riego (Figura 5). Los tratamientos empleados afectaron significativamente a la PA durante las cuatro campañas. La mayor producción junto con una reducción significativa del agua aportada dio lugar a valores significativamente superiores de PA en los tratamientos RGS70-100 y RGS100/40-100 junto con ratios inferiores en los tratamientos RG/RGS100-50 y RG100/40-100 en los cuatro años evaluados.

Las diferentes estrategias afectaron significativamente los valores de PA. En cuanto al sistema de riego, el RGS presentó una eficiencia hídrica significativamente mayor a la obtenida con RG en las campañas ON del ensayo. Con respecto a la reducción de agua en RGS, esta afectó significativamente a la PA de las tres primeras campañas, con eficiencias significativamente superiores para ambas estrategias de déficit hídrico (70 y 100/40 % ETc). Por otro lado, el factor utilizado para calcular el volumen de agua de lluvia disponible para el sistema radicular también afectó a este parámetro. Así, los valores de eficiencia fueron mayores en árboles que teóricamente utilizaron el 100 % de AC que en aquellos que utilizaron el 50 % durante todo el ensayo.

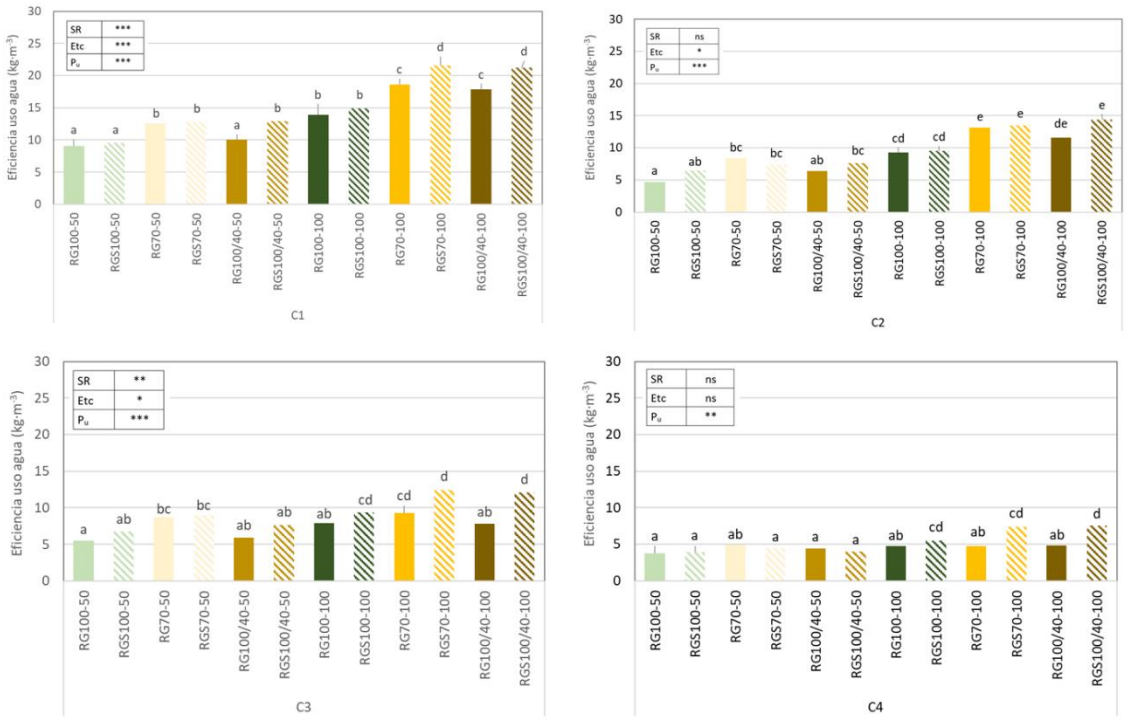


Figura 5. Eficiencia en el uso del agua en las campañas de ensayo. ANOVA (por campaña): diferencias entre tratamientos. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente ($p \leq 0,05$).

8. Efecto del manejo sobre las características físico y químicas de calidad del fruto.

Además de la producción, se evaluó el efecto de los tratamientos sobre parámetros de calidad del fruto. En las tres primeras campañas hubo diferencias significativas en el peso, diámetro y número de frutos, en el espesor de corteza y en los azúcares, acidez e índice de madurez del zumo de los distintos tratamientos (Tablas 4-7). Sin embargo, aunque las diferencias en estos parámetros entre campañas debidas a los tratamientos son variables, los valores estuvieron dentro del rango considerado óptimo según los estándares establecidos para fruta comercial. A continuación, se analiza el efecto de los tres factores evaluados (SR, ETc y Pu).

En cuanto el sistema de riego, los árboles regados con riego a goteo subterráneo (RGS) presentaron un mayor peso, aunque solo fue significativo en C1, y número de frutos recolectados en C3 y C4. Además, tanto la acidez como la concentración de azúcares fue menor en el zumo de estos árboles, posiblemente debido a la dilución debida al mayor peso.

Por otro lado, los árboles control con el 100 % de ETc cubierta por el agua de riego tuvieron un peso del fruto, y en la primera campaña, un espesor de la corteza, mayores que aquellos regados bajo regímenes deficitarios (70 y 100/40) siendo solo significativos en las campañas segunda y tercera. No se observaron diferencias significativas entre estrategias deficitarias. Este mayor peso no dio lugar a un incremento en el calibre. En cuanto a los sólidos solubles y acidez, la restricción de agua de riego del 70 % ETc dio lugar a frutos con una menor concentración respecto al 100/40%.

Tabla 4. Parámetros de calidad del fruto en la campaña 1 de los diferentes tratamientos realizados.

Tratamiento	Peso (g)	nº frutos	$Ø_{Fruto}$ (mm)	$Esp_{corteza}$ (mm)	Corteza (%)	Zumo (%)	SST (° Brix)	Acidez ($mg \cdot L^{-1}$)	IM (SST/AT)
RG_{100-50}	92,3bc	691ab	48,21ab	2,97a	50,87	46,90	13,23cd	0,86a	15,43d
RGS_{100-50}	96,9bc	695ab	49,26b	2,83a	50,00	48,57	12,40a	0,89a	13,90bc
RG_{70-50}	91,2ab	756cd	48,72ab	3,00a	51,07	47,10	13,47cd	0,89a	15,40d
RGS_{70-50}	99,3c	706bc	47,99ab	2,80a	49,57	47,30	12,57ab	0,87a	14,50cd
$RG_{100/40-50}$	90,0a	606a	50,94c	2,83a	50,53	47,33	13,53d	1,04cd	13,03ab
$RGS_{100/40-50}$	93,6bc	746bc	48,29ab	2,83a	49,53	48,47	13,00bc	0,91ab	14,43bc
$RG_{100-100}$	92,5bc	762cd	49,14b	4,83b	49,40	47,93	12,83bc	0,95cd	13,57bc
$RGS_{100-100}$	97,6bc	774d	48,75ab	3,90ab	48,63	47,87	12,80bc	0,91ab	14,07bc
RG_{70-100}	98,2bc	640ab	48,18ab	2,90a	51,07	46,73	12,83bc	1,00d	12,97a
RGS_{70-100}	98,9c	733bc	47,31a	2,93a	51,10	46,87	12,73ab	0,92bc	13,90bc
$RG_{100/40-100}$	96,6bc	626ab	48,62ab	2,83a	50,80	46,70	13,40cd	0,99cd	13,50ab
$RGS_{100/40-100}$	98,8c	728bc	48,55ab	2,83a	50,90	47,30	13,17bc	0,89ab	14,87cd
ANOVA[1]	*	*	*	*	ns	ns	*	*	*
SR (RG/RGS)	**	ns	ns	ns	ns	ns	**	*	ns
$ETc_{(100-70-100/40\%)}$	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	Ns	ns
$P_{u(50-100\ \%\ AC)}$	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	Ns	ns

[1]ANOVA (por campaña): factor (tratamientos, sistema de riego, ETc, porcentaje precipitación útil) significativo para $p \leq 0,05$ (*), $p \leq 0,01$ (**) y $p \leq 0,001$ (***), ns no significativo. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente ($p \leq 0,05$).

La restricción de agua al considerar los dos factores de aprovechamiento del agua de riego afectó de forma inconsistente al peso y diámetro del fruto, con comportamientos diferentes entre campaña. Sin embargo, las diferencias en estos parámetros no son agronómicamente reseñables, consiguiendo frutos con un peso medio en torno a 100 g y de diámetro 50 mm en todas las campañas. Además, el porcentaje de zumo presentó valores más altos en los árboles regados con un aprovechamiento de la P_e del 50 % AC. Este resultado podría deberse al mayor volumen de agua aplicado en estas plantas con respecto al 100 % AC.

Tabla 5. Parámetros de calidad del fruto en la campaña 2 de los diferentes tratamientos realizados

Tratamiento	Peso (g)	nº frutos	$Ø_{Fruto}$ (mm)	$Esp_{corteza}$ (mm)	Corteza (%)	Zumo (%)	SST (° Brix)	Acidez ($mg \cdot L^{-1}$)	IM (SST/AT)
RG_{100-50}	103,2cd	295a	61,91de	3,50	49,13	47,83ab	13,60cd	0,90ab	15,40bc
RGS_{100-50}	94,1ab	448ab	61,78cd	3,37	49,06	48,25ab	13,17ab	0,97b	13,45a
RG_{70-50}	88,5a	510b	59,66a	3,37	48,82	47,99ab	13,97cd	0,90ab	15,17vc
RGS_{70-50}	97,3bc	407ab	60,89cd	3,47	50,87	45,29a	13,40bc	0,87ab	15,53bc
$RG_{100/40-50}$	92,6ab	365ab	60,74bc	3,57	51,51	47,17ab	14,10d	0,93ab	14,83bc
$RGS_{100/40-50}$	89,6ab	458ab	60,68bc	3,43	48,72	49,25b	13,93cd	0,93ab	13,97ab
$RG_{100-100}$	107,1d	397ab	62,65d	3,40	49,39	48,59ab	12,63a	0,87ab	14,43ab
$RGS_{100-100}$	100,7cd	443ab	62,12de	3,40	49,67	45,28a	12,73ab	0,87ab	15,00c

RG$_{70-100}$	94,91ab	459ab	60,86cd	3,43	49,55	48,06ab	13,10ab	0,93ab	13,97ab
RGS$_{70-100}$	102,4cd	450ab	62,25de	3,53	50,01	47,58ab	13,20ab	0,90ab	14,93bc
RG$_{100/40-100}$	95,4bc	408ab	60,39ab	3,43	49,66	48,08ab	13,70cd	1,00b	14,00ab
RGS$_{100/40-100}$	97,0bc	501b	61,15cd	3,37	48,58	46,62ab	13,23bc	0,80a	16,30c
ANOVA[1]	*	*	*	ns	ns	*	*	*	*
SR (RG/RGS)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ETc$_{(100-70-100/40\%)}$	*	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P$_{u(50-100\ \%\ AC)}$	*	ns	*	ns	ns	***	ns	ns	ns

[1]ANOVA (por campaña): factor (tratamientos, sistema de riego, ETc, porcentaje precipitación útil) significativo para p ≤ 0,05 (*), p ≤ 0,01 (**) y p ≤ 0,001 (***), ns no significativo. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente (p ≤ 0,05).

Tabla 6. Parámetros de calidad del fruto en la campaña 3 de los diferentes tratamientos realizados

Tratamiento	Peso (g)	nº frutos	Ø$_{Fruto}$ (mm)	Esp$_{corteza}$ (mm)	Corteza (%)	Zumo (%)	SST (° Brix)	Acidez (mg·L^{-1})	IM (SST/AT)
RG$_{100-50}$	112,6d	353ab	59,84ab	3,29	51,90	45,99	12,70ab	1,02ab	12,42bc
RGS$_{100-50}$	110,5cd	441ab	58,76ab	3,15	51,69	46,17	12,37a	1,00ab	12,33ab
RG$_{70-50}$	99,2ab	484bc	57,07a	3,21	50,94	46,14	13,07b	1,02ab	12,88bc
RGS$_{70-50}$	94,7a	528c	58,28ab	3,04	49,99	47,50	12,57ab	1,04ab	12,17ab
RG$_{100/40-50}$	95,1ab	350ab	59,42ab	3,04	51,16	46,32	13,03b	1,15b	11,34ab
RGS$_{100/40-50}$	100,4bc	422ab	59,37ab	3,24	51,65	45,81	12,77ab	1,09bc	11,78ab
RG$_{100-100}$	111,0cd	402ab	60,00b	3,20	53,23	44,70	12,73ab	1,04ab	12,27ab
RGS$_{100-100}$	103,8bc	521bc	59,82ab	2,98	51,39	45,54	12,37a	1,11bc	11,20a
RG$_{70-100}$	107,5cd	334ab	59,16ab	3,27	53,03	44,43	12,60ab	1,10bc	11,47ab
RGS$_{70-100}$	104,9bc	482bc	60,47b	3,18	51,77	45,22	12,63ab	1,02ab	12,58bc
RG$_{100/40-100}$	101,5bc	296a	60,24b	3,12	52,88	45,21	12,63ab	1,13bc	11,15a
RGS$_{100/40-100}$	105,7bc	439ab	59,60ab	3,01	51,96	45,87	12,87ab	0,96a	13,43c
ANOVA[1]	*	*	*	ns	ns	ns	*	*	*
SR (RG/RGS)	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
ETc$_{(100-70-100/40\%)}$	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P$_{u(50-100\ \%\ AC)}$	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

[1]ANOVA (por campaña): factor (tratamientos, sistema de riego, ETc, porcentaje precipitación útil) significativo para p ≤ 0,05 (*), p ≤ 0,01 (**) y p ≤ 0,001 (***), ns no significativo. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente (p ≤ 0,05)

Tabla 7. Parámetros de calidad del fruto en la campaña 4 de los diferentes tratamientos realizados.

Tratamiento	Peso (g)	nº frutos	Ø$_{Fruto}$ (mm)	Esp$_{corteza}$ (mm)	Corteza (%)	Zumo (%)	SST (º Brix)	Acidez (mg·L^{-1})	IM (SST/AT)
RG$_{100-50}$	96,0	324ab	59,17	2,84ab	49,64	47,61b	12,90a	1,17ab	11,07
RGS$_{100-50}$	95,9	343ab	59,00	2,94ab	52,00	44,58b	13,03ab	1,16a	11,23
RG$_{70-50}$	92,0	347bab	58,27	2,93ab	51,87	44,05ab	14,17c	1,33c	10,64

RGS$_{70-50}$	89,6	326ab	59,73	2,75a	50,87	45,54b	13,00ab	1,16a	11,21
RG$_{100/40-50}$	93,5	314ab	58,90	3,00bc	51,01	45,10b	14,00bc	1,33c	10,55
RGS$_{100/40-50}$	91,8	289ab	58,43	2,93ab	51,32	45,94b	13,00ab	1,15a	11,33
RG$_{100-100}$	102,9	300ab	60,37	2,93ab	48,34	43,86ab	13,03ab	1,19ab	10,96
RGS$_{100-100}$	95,9	372b	59,87	2,76a	52,26	46,04b	13,13ab	1,18ab	11,17
RG$_{70-100}$	103,1	210a	60,13	3,12bc	52,08	43,11ab	13,63bc	1,28bc	10,66
RGS$_{70-100}$	100,2	335ab	59,93	3,07bc	54,79	45,32b	13,47bc	1,20bc	11,21
RG$_{100/40-100}$	93,9	234ab	59,73	3,18c	53,10	43,31ab	14,03bc	1,29bc	10,84
RGS$_{100/40-100}$	94,2	361b	59,23	2,94ab	53,66	39,60a	13,50bc	1,23bc	11,00
ANOVA[1]	ns	*	ns	*	ns	*	*	*	ns
SR (RG/RGS)	ns	*	ns	ns	ns	ns	*	*	ns
ETc$_{(100-70-100/40\%)}$	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns
P$_{u(50-100\ \%\ AC)}$	*	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns

[1]ANOVA (por campaña): factor (tratamientos, sistema de riego, ETc, porcentaje precipitación útil) significativo para p ≤ 0,05 (*), p ≤ 0,01 (**) y p ≤ 0,001 (***), ns no significativo. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente (p ≤ 0,05)

9. Impacto de las técnicas de fertirriego sobre el estado nutricional de las plantas

Con respecto a la concentración de macronutrientes (Tabla 8) y micronutrientes (Tabla 9) en las hojas del brote primaveral, se observaron diferencias significativas entre las distintas campañas (C1-C4) en la mayoría de los nutrientes analizados (datos no mostrados) . Sin embargo, en todas las campañas, los valores estuvieron dentro del rango considerado óptimo según los estándares descritos por Quiñones *et al.* (2012). Tan solo la concentración de Mg mostró valores ligeramente más altos debido a la alta concentración de este elemento en el agua de riego.

Tabla 8. Concentración foliar de macronutrientes principales (%) en noviembre

Campaña	**1**			**2**			**3**			**4**		
Tratamiento	**N**	**P**	**K**	**N**	**P**	**K**	**N**	**P**	**K**	**N**	**P**	**K**
RG$_{100-50}$	2,08	0,11	0,47	2,18	0,12	0,56	2,25	0,12	0,83	2,44	0,11	0,83
RGS$_{100-50}$	2,10	0,12	0,50	2,13	0,11	0,50	2,23	0,12	0.77	2,42	0,10	0,86
RG$_{70-50}$	2,08	0,10	0,48	2,32	0,13	0,64	2,23	0,10	0,74	2,40	0,10	0,96
RGS$_{70-50}$	2,08	0,11	0,44	2,37	0,13	0,55	2,25	0,11	0,74	2,41	0,11	1,04
RG$_{100/40-50}$	2,09	0,10	0,46	2,18	0,13	0,58	2,27	0,11	0,81	2,43	0,10	0,97
RGS$_{100/40-50}$	2,10	0,12	0,47	2,15	0,11	0,53	2,25	0,11	0,71	2,44	0,1	0,82
RG$_{100-100}$	2,06	0,09	0,43	2,23	0,13	0,53	2,25	0,12	0,75	2,40	0,11	1,08
RGS$_{100-100}$	2,08	0,11	0,49	2,24	0,13	0,56	2,28	0,11	0,70	2,43	0,11	0,83
RG$_{70-100}$	2,05	0,09	0,42	2,24	0,13	0,55	2,27	0,12	0,85	2,39	0,10	0,87
RGS$_{70-100}$	2,15	0,12	0,50	2,30	0,13	0,61	2,22	0,11	0,86	2,40	0,11	1,04
RG$_{100/40-100}$	2,05	0,09	0,41	2,23	0,13	0,61	2,20	0,11	0,75	2,42	0,10	0,91

$RGS_{100/40-100}$	2,14	0,11	0,46	2,22	0,13	0,62	2,27	0,11	0,75	2,44	0,10	0,96
ANOVA[1]	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SR (RG/RGS)	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ETc (100-70-100/40%)	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P_u (50-100 % AC)	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

[1]ANOVA (por campaña): factor (tratamientos, sistema de riego, ETc, porcentaje precipitación útil) significativo para p ≤ 0,05 (*), p ≤ 0,01 (**) y p ≤ 0,001 (***), ns no significativo. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente (p ≤ 0,05).

Tabla 9. Concentración foliar de micronutrientes principales (ppm) en noviembre

Campaña	**1**			**2**			**3**			**4**		
Tratamiento	**Fe**	**Zn**	**Mn**	**Fe**	**Zn**	**Mn**	**Fe**	**Zn**	**Mn**	**Fe**	**Zn**	**Mn**
RG_{100-50}	62	24	22	53^{abc}	35^{cde}	48^{bc}	44	10	14	58	13	17
RGS_{100-50}	64	26	25	70^{cd}	37^{def}	56^{d}	44	9	15	56	12	17
RG_{70-50}	48	25	22	49^{abc}	30^{abc}	45^{ab}	48	8	14	59	15	16
RGS_{70-50}	50	24	22	90^{de}	39^{ef}	53^{cd}	39	8	14	54	14	16
$RG_{100/40-50}$	62	27	24	60^{bc}	40^{f}	58^{d}	44	9	14	58	12	16
$RGS_{100/40-50}$	71	29	25	75^{cd}	37^{def}	53^{cd}	43	8	13	69	13	16
$RG_{100-100}$	59	26	23	66^{bcd}	31^{ab}	45^{ab}	37	9	15	74	16	17
$RGS_{100-100}$	62	28	24	50^{abc}	34^{bcd}	48^{bc}	47	11	16	68	15	16
RG_{70-100}	54	24	20	118^{d}	40^{f}	53^{cd}	45	8	15	54	14	17
RGS_{70-100}	60	24	25	53^{abc}	33^{bcd}	48^{bc}	49	10	16	59	10	17
$RG_{100/40-100}$	44	23	20	24^{a}	31^{abc}	41^{a}	40	10	15	58	12	16
$RGS_{100/40-100}$	56	25	23	41^{ab}	27^{a}	41^{a}	42	9	15	57	12	16
ANOVA[1]	ns	ns	ns	***	***	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SR (RG/RGS)	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
ETc (100-70-100/40%)	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P_u (50-100 % AC)	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	*	*	ns	ns	ns

[1]ANOVA (por campaña): factor (tratamientos, sistema de riego, ETc, porcentaje precipitación útil) significativo para p ≤ 0,05 (*), p ≤ 0,01 (**) y p ≤ 0,001 (***), ns no significativo. Las medias seguidas de letras diferentes difieren significativamente (p ≤ 0,05).

10. Estrategias para una fertirrigación sostenible de los cítricos

De las combinaciones posibles, la estrategia de déficit hídrico del 70 % ETc, desde el inicio de desarrollo del fruto (principio de julio) hasta el inicio de la brotación-floración del siguiente ciclo vegetativo, en riego a goteo subterráneo considerando el 100 % de la superficie de copa, para el cálculo del aprovechamiento de la precipitación, dio lugar a árboles con una producción similar a la obtenida sin restricción consiguiendo un ahorro de agua de riego cercana al 60 % y una productividad del uso de agua del 13 $kg \cdot m^{-3}$. Se seleccionó esta etapa para el estrés hídrico dado que está establecido que el momento más adecuado para aplicar estrés hídrico en cítricos

es después de la caída de frutos (Appiah *et al.*, 2021) que tiene lugar en junio en las condiciones de cultivo de la Comunidad Valenciana.

Los resultados obtenidos muestran como el sistema de riego a goteo subterráneo permite, a igualdad de dosis de riego aplicada, una mayor productividad en el uso del agua, dando lugar a una mayor producción que la obtenida en plantas regadas con goteo superficial. Este resultado podría deberse a que los sistemas de goteo subsuperficial pueden mejorar aún más la eficiencia del riego y el uso de fertilizantes porque el agua y los nutrientes se aplican directamente a la zona de raíces (Camp, 1998). Sin embargo, Martínez-Gimeno *et al.* (2018) obtuvieron una menor producción en clementinos en riego subterráneo, si bien los árboles regados con este sistema recibieron una menor cantidad de agua de riego ya que se regaba a partir de sensores capacitivos de tipo FDR para medir la humedad del suelo. En otros cultivos leñosos, El-Attar *et al.* (2019) obtuvo, también, mayores rendimientos bajo RGS en comparación con sistemas de RG en mangos adultos durante dos campañas, con un mayor peso del fruto, con igual aporte de agua. Igualmente, árboles de palmera obtuvieron mayor producción de dátiles, así como, frutos más grandes cuando se regaron con sistemas de riego subterráneo (Ahmed Mohammed *et al.*, 2020). Por el contrario, Bryla *et al.* (2003) encontraron un rendimiento y tamaño de fruto similar en árboles de melocotón mediante riego superficial y subterráneo.

Por otro lado, se han evaluado técnicas de riego deficitarias en cítricos y otros frutales con las que se ha logrado reducir el aporte de agua sin menoscabo de la producción y calidad del fruto, e incrementando la eficiencia de uso del agua. Principalmente el mantenimiento de una reducción constante del 70 % ETc durante las etapas no sensibles al riego deficitario da lugar a una mejor respuesta en la mayor parte de los parámetros evaluados. Estas herramientas se han utilizado en las últimas décadas con óptimos resultados en cítricos (Domingo *et al.*, 1996; González-Altozano y Castel, 1999; Goldhamer y Salinas, 2000). Ginestar y Castel (1996) observaron una disminución en la producción, aunque no significativa, a medida que se reducía la cantidad de agua de riego en clementina 'Nules' a lo largo del ciclo de cultivo. Sin embargo, Velez *et al.*, (2007) concluyó que los tratamientos de riego deficitario comparados con el control, en riego a goteo, permitieron ahorros estacionales de agua entre el 12 y el 18 % sin reducir la producción. En cuanto a la EUA, García-Tejero *et al.* (2011) afirmaron que estaba fuertemente influenciada por la estrategia de riego empleada en diferentes etapas fenológicas, más que por la cantidad de agua aportada en régimen deficitario. En este sentido, los mejores resultados se registraron cuando el estrés se realizó en la madurez del fruto; sin embargo, el tratamiento más restrictivo durante el crecimiento del fruto tuvo una eficiencia menor, obteniendo valores incluso por debajo del tratamiento regado al 100 %. Los tratamientos en los que se aplicó estrés hídrico en la floración y madurez mostraron valores de EUA similares, confirmando que la productividad del agua no solo depende de la cantidad de agua aplicada sino de en qué momento fenológico se realiza el déficit hídrico.

En otros cultivos, Mitchell y Chalmers (1982) en melocotón y Mitchell *et al.* (1989) en peral obtuvieron, también, importantes ahorros de agua de riego mediante el uso de estrategias de riego deficitario controlado sin reducir el rendimiento. Del mismo modo, en almendros, Goldhamer *et al.* (2006) analizaron el impacto de tres patrones diferentes del estrés hídrico. El riego deficitario sostenido que aplicó agua de riego un porcentaje de la ETc durante todo el ciclo de cultivo fue la mejor estrategia en términos de rendimiento (considerando el tamaño del fruto

y la producción final). Romero *et al.* (2004) analizaron, también, la influencia de varias estrategias de RDC bajo riego por goteo superficial y subsuperficial. Así, el RDC, con una reducción severa durante el engrosamiento del fruto (20 % ETc) y una recuperación postcosecha al 75 % ETc o hasta el 50 % ETc en riego por goteo subsuperficial, parece ser una estrategia adecuada en almendros cultivados bajo condiciones semiáridas, ahorrando una cantidad significativa de agua de riego. Los efectos del riego deficitario sobre el rendimiento y el desarrollo vegetativo también han sido analizados para olivos regados por goteo. Así, algunos autores (Tognetti *et al.*, 2006) determinaron que la disponibilidad de agua antes de la floración o durante las primeras etapas del crecimiento de los frutos puede afectar al peso de los frutos, más que en el verano en olivo. Comparando diferentes tratamientos, el riego deficitario durante todo el verano dio lugar a un mejor estado hídrico de las plantas con respecto a otros regímenes de riego. En manzano, un riego deficitario controlado durante el período de 64 a 105 días después de la floración y con riego del 100 % ETc en las fases anterior y posterior en riego subterráneo permitió una reducción del uso del agua del 47 % sin pérdidas en producción ni calidad del fruto (Azzeddine *et al.* 2018).

Del mismo modo, se han reportado resultados similares en almendros (Goldhamer *et al.,* 2000), manzanos (Ebel *et al.,* 1995), albaricoqueros (Ruiz-Sánchez *et al.,* 2000), perales (Mitchell *et al.,* 1989), pistachos (Goldhamer y Beede, 2004), viña (Bravdo y Naor, 1996; McCarthy *et al.,* 2002) y olivos (Moriana *et al.,* 2003; Fernández *et al.,* 2006).

Como se indicó, no hay información disponible sobre los efectos de diferentes factores de UEP en el ahorro de agua de riego.

En cuanto a los parámetros de calidad de la fruta, en términos generales, el riego a goteo subterráneo y la no reducción de agua a lo largo del ciclo de cultivo (100 % ETc) originaron frutos de mayor peso. Además, la restricción de agua dio lugar a un incremento tanto en la acidez como en los azúcares del fruto. Sin embargo, tanto el calibre presentado como los parámetros químicos del zumo presentaron valores considerados óptimos para su comercialización. En este sentido, algunos autores han reportado como el déficit hídrico también afecta a la calidad externa e interna de los cítricos, aumenta la relación corteza/pulpa (Hilgeman, 1977; Mougheith *et al.*, 1977), así como la concentración de azúcares (Castel y Buj, 1990) y la acidez en el zumo (Cruse *et al.*, 1982). Velez *et al.* (2007) observaron que los parámetros de calidad de la fruta se altera ligeramente por el riego deficitario aplicado, con resultados inconsistentes. Así, las frutas de los árboles regados deficitariamente eran más ácidas, aunque no más dulces que las de los árboles de control, en el primer año del ensayo; no obstante, las frutas de los árboles con estrés hídrico tuvieron significativamente más grados Brix y una acidez similar en el segundo año. Por otro lado, en ambos años, el IM no presentó modificaciones significativas por las restricciones hídricas aplicadas, tal y como ocurre en nuestro ensayo. Pérez-Sarmiento *et al.* (2010) también encontraron que los valores de sólidos solubles aumentaron significativamente con el tratamiento RDC, mientras que la acidez fue igual en los todos los tratamientos control y deficitario y, por lo tanto, el IM aumentó significativamente en el tratamiento restrictivo. El RDC se ha utilizado con éxito, manteniendo el rendimiento y la calidad de la fruta, con valores más altos de azúcares y acidez en cítricos (Domingo *et al.*, 1996; González-Altozano y Castel, 1999; Goldhamer y Salinas, 2000), manzano (Ebel *et al.,* 1995), melocotón (López *et al.*, 2008),

albaricoque (Ruiz-Sánchez *et al.,* 2000), frutos secos (Romero *et al.,* 2004), viña (Bravdo y Naor, 1996; McCarthy *et al.,* 2002) y olivos (Moriana *et al.,* 2003).

El coeficiente teórico de aprovechamiento de agua 100 % AC para la estimación de los requerimientos de riego dio lugar a un mayor ahorro de agua y eficiencia de uso de esta, sin diferencias significativas en el resto de los parámetros. Al ser un parámetro teórico se necesitarían más ensayos para mejorar el porcentaje de lluvia que conduzca a los mayores rendimientos. No hay información disponible sobre los efectos de los diferentes factores de aprovechamiento de la precipitación efectiva o Pútil en el ahorro de agua de riego ni la producción y calidad del fruto en cítricos y otros frutales. Tan solo, existen desarrollos de metodologías para su cálculo, en función de condiciones climáticas, a través de programas informáticos, sin ensayos de su implantación a campo (Ucar *et al.* 2023).

Por último, los diferentes factores (SR, RDC y Pútil) no afectaron a la ionómica foliar. No se dispone de mucha información al respecto. Chartzoulakis y Bertaki (2001) obtuvieron una mejor absorción de nutrientes en riego a goteo subterráneo, con una mayor concentración foliar que en árboles en goteo superficial.

11. Conclusiones y perspectivas futuras

La gestión eficiente de los sistemas de riego a nivel de parcela es un factor muy importante en la agricultura de regadío y, dada la competencia por los recursos hídricos con otros sectores, es un tema clave en términos de sostenibilidad económica y ambiental de la agricultura. En general, los sistemas de riego por superficie y presurizados pueden alcanzar un nivel razonable de eficiencia cuando están bien diseñados, operados adecuadamente y seleccionados apropiadamente para condiciones específicas. El riego por goteo subterráneo se presenta, como una alternativa al dar lugar a una mayor producción de frutas y eficiencia en el uso del agua. Además, el empleo de estrategias de riego deficitario controlado también proporciona ahorro en el agua de riego, sin reducir la producción ni la calidad del fruto. Por todo ello, tanto los sistemas de goteo subterráneo como el estrés hídrico aplicado en ciertas etapas fenológicas del cultivo se muestran como herramientas útiles para mejorar la gestión del riego y mantener niveles de producción sostenibles bajo condiciones áridas y semiáridas. Por otro lado, es importante enfatizar la importancia del cálculo de coeficientes de aprovechamientos de la lluvia efectiva que conducen a la reducción de volúmenes de agua aplicados, sin afectar la producción ni la calidad de la fruta.

El actual desarrollo de nuevos productos agronutrientes y bioestimulantes que incrementan la superficie de absorción radicular, a la vez que dan lugar a incrementos en la eficiencia de absorción de agua y nutrientes por las plantas, podría ser otra estrategia para reducir los aportes de agua de riego en zonas con escasez de agua. Los agronutrientes, al mejorar la estructura del suelo y aumentar la disponibilidad de nutrientes, promueven un crecimiento más robusto y eficiente de las raíces. De manera complementaria, los bioestimulantes, que incluyen sustancias como aminoácidos, extractos de algas y microorganismos beneficiosos, actúan potenciando las funciones fisiológicas de las plantas, incrementando su resistencia al estrés hídrico y mejorando su capacidad para absorber agua y nutrientes de manera más eficaz. Serán necesarios estudios

que cuantifiquen las reducciones adecuadas a utilizar mediante el empleo de estos productos, ya que su efectividad puede variar según el tipo de cultivo, las condiciones del suelo y el clima local. Además, la integración de estos productos en prácticas agrícolas sostenibles no solo podría contribuir a una mayor eficiencia en el uso del agua, sino también a la mejora de la salud del suelo y la reducción de su impacto ambiental, fomentando así una agricultura más resiliente y adaptada a los desafíos del cambio climático.

Bibliografía

Adnan, S.; Khan, A. (2011). Effective Rainfall for Irrigated Agriculture Plains of Pakistan. Pakistan Journal of Meteorology. 6 (11): 61-72.

Ahmed Mohammed, M.E.; Refdan Alhajhoj, M.; Ali-Dinar, H.M.; Munir, M. (2020) Impact of a Novel Water-Saving Subsurface Irrigation System on Water Productivity, Photosynthetic Characteristics, Yield, and Fruit Quality of Date Palm under Arid Conditions. Agronomy 10, 1265. https://doi.org/10.3390/agronomy10091265.

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements). FAO Irrigation and Drainage., paper Nº 56, FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations), Rome, Italy.

Al-Ghobari, H.M.; Dewidar, A.Z. (2018). Integrating deficit irrigation into surface and subsurface drip irrigation as a strategy to save water in arid regions. Agricultural Water Management, vol. 209, issue C, 55-61.

Appiah, S.A.; Li, J.; Lan, Y.; Alordzinu, K.E.; Aasmi, A.A.; Wang, H.; Qiao, S.; Owusu-Sekyere, E.; Afful, E.; Asenso, E.; Issaka, F. (2021). Regulated deficit irrigation (RDI) under citrus species production: A review. Journal of Horticulture and Forestry. 13. 74-95. 10.5897/JHF2021.0676.

ASAE (2001) ASAE Standard S526.2, JAN01, In: Soil and Water Terminology, ASAE, St.Joseph, Michigan USA.

Azzeddine, C.; Monney, P.; Ferreira, M.; Houria, C.; Carlen, Christoph. (2018). Scheduling Deficit Subsurface Drip Irrigation of Apple Trees to Optimize Water Use Efficiency. 10.1007/978-3-319-70548-4_219.

Berbel, J.; Expósito, A.; Gutiérrez-Martín, C.; Mateos, L. (2019). Effects of the Irrigation Modernization in Spain 2002–2015. Water Resour. Manag. 2019, 33, 1835–1849.

Bravdo, B.; Naor, A. (1996). Effect of water regime on productivity and quality of fruit and wine. Acta Horticulturae, 427, pp. 15–26.

Bryla, D.R.; Trout, T.J.; Ayars, J.E. (2003). Growth and production of young peach trees irrigated by furrow, microjet, surface drip, or subsurface drip systems. HortScience, 38(6), pp.1112-1116.

Camp, C.R. (1998). Subsurface drip irrigation: a review. Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineers 41(5): 1353-1367 (doi: 10.13031/2013.17309).

Chartzoulakis, K. & Bertaki, M. (2001). Towards Sustainable Water Use on Mediterranean Islands: Addressing Conflicting Demands and Varying Hydrological, Social and Economic Conditions WORK PACKAGE 2 In: Investigation of irrigation methods – Recommendations. Deliverable D14 and D22. Project No EVK1 – CT – 2001 – 00092. Funded by the European Commission.

Comisión Europea. (2019). A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. Consultado en https://www.consilium.europa.eu/es/policies/green-deal/ el 3/01/2024.

Comisión Europea. (2020). De la granja a la mesa: Estrategia para un sistema alimentario justo, sano y respetuoso con el medio ambiente. Consultado en https://www.consilium.europa.eu/es/policies/from-farm-to-fork/ el 13/05/2024.

Consellería de Agricultura, Ganadería y Pesca (2023). Previsión de la cosecha de cítricos. Comunitat Valenciana. Campaña 2023/2024. Septiembre 2023. Servicio de Documentación, Publicaciones y Estadística Departamental.

Dalin, C.; Charlotte L. (2019). Outhwaite Impacts of Global Food Systems on Biodiversity and Water: The Vision of Two Reports and Future Aims. One Earth 1, Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2019.10.016.

Dastane, N.G. (1974). Effective rainfall in irrigated agriculture. FAO. Irrigation and Drainage Paper 25, Flood and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.

Domingo, R.; Ruiz-Sánchez, M.C.; Sánchez-Blanco, N.J. Torrecillas, A. (1996). Water relations, growth and yield of Fino lemon trees under regulated deficit irrigation. Irrigation Science 16, pp. 115–123.

Ebel, R.C.; Proebsting, E.L. Evans, R.G. (1995). Deficit irrigation to control vegetative growth in apple and monitoring fruit growth to schedule irrigation. HortScience, 30, pp. 1229–1232.

El-Attar, H.A.; Merwad, M.A.; Mostafa, E.A.M.; Saleh, M.M.S. (2019). Yield, fruit quality and leaf mineral content of mango trees as affected by subsurface drip irrigation system. Bioscience Research: 16(1):620-628.

El-Otmani, M.; Ait-Oubahou, A.; El-Hassainate, F.; Kaanane, A. Lovatt, C.J. (2004). Effect of Gibberellic acid, urea and KNO3 on yield and on composition and nutritional quality of clementine mandarin fruit juice. Acta Horticulturae (ISHS), 2, pp. 149-157.

Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos - ESYRCE. (2024). Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Subsecretaría de Agricultura Pesca y Alimentación.

Fernández, J.E.; Díaz-Espejo, A.; Infante, J.M.; Durán, P.; Palomo, M.J.; Chamorro, V.; Girón, I.F.; Villagarcía, L. (2006). Water relations and gas exchange in olive trees under regulated deficit irrigation and partial rootzone drying. Plant and Soil, 284, pp. 273-291.

García-Tejero, I. (2010). Deficit irrigation for sustainable Citrus cultivation in Guadalquivir River basin. Ph. D. Thesis. Universidad de Sevilla, Spain 285 pp.

Goldhamer, D.A. Salinas, M. (2000). Evaluation of regulated deficit irrigation on mature orange trees grown under high evaporative demand. In: Proceedings of the International Society of Citriculture, IX Congress. Orlando, FL: ISC, pp. 227–231.

Goldhamer, D.A. & Viveros, M. (2000). Effects of preharvest irrigation cut off durations and postharvest water deprivation on almond tree performance. Irrigation Science, 19, pp. 125–131.

Goldhamer, D.A.; Viveros, M. & Salinas, M. (2006). Regulated deficit irrigation in almonds: effects of variations in applied water and stress timing on yield and yield components. Irrigation Science, 24, pp. 101–114.

González-Altozano, P. & Castel, J.R. (1999). Regulated deficit irrigation in Clementina de Nules' citrus trees. I. Yield and fruit quality effects. Journal of Horticultural Science and Biotechnology 74, pp. 706–713.

Legaz, F.; Quiñones, A.; Martínez-Alcántara, B.; Primo-Millo, E. (2008). Fertilización de los cítricos en riego a goteo II: Mg y microelementos. Levante Agrícola 400: 8-12.

López, G:; Rabones, A.; del Campo, J.; Mata, M.; Vallverdú, X.; Girona, J.; Marsal, J. (2008). Response of peach trees to regulated deficit irrigation during stage II of fruit development and summer pruning. Spanish Journal of Agricultural Research, 6, pp.479- 491.

Marković, M.;Atilgan, A.; Čadro, S.; Oršolić, M.; Zebec, V. (2021). The evaluation of effective rainfall under different climatic conditions. Conference: 56. hrvatski i 16. međunarodni simpoziji agronomaAt: Vodice, Hrvatska.

Martínez-Gimeno, M.A.; Bonet, L.; Provenzano, G.; Badal, E.; Intrigliolo, D. S.; Ballester, C. (2018). Assessment of yield and water productivity of clementine trees under surface and subsurface drip irrigation. Agricultural Water Management, 206, 209-216. http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.05.011.

McCarthy, M.G.; Loveys, B.R.; Dry, P.R.; Stoll, M. (2002). Regulated deficit irrigation and partial rootzone drying as irrigation management techniques for grapevines. In: Deficit irrigation practices, FAO Water Reports No. 22. Rome, Italy: FAO, pp. 79–87.

Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Gestión Sostenible de Regadíos. (2021). Disponible online: https://www.mapa.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/gestion-sostenible-regadios/ (acceso el 04 junio 2023).

Mitchell, P.D.; Chalmers, D.J. (1982). The effect of reduced water supply on peach tree growth and yields. Journal of the American Society of Horticultural Science 107, pp. 853–856.

Mitchell, P.D.; van den Ende, B.; Jerie, P.H. & Chalmers, D.J. (1989). Response of 'Bartlett' pear to withholding irrigation, regulated deficit irrigation, and tree spacing. Journal of the American Society of Horticultural Science, 114, pp. 15–19.

Moriana, A.; Orgaz, F.; Pastor, M.; Fereres, E. (2003). Yield responses of mature olive orchard to water deficits. Journal of the American Society for Horticultural Science, 123, pp. 425–431.

Pérez-Sarmiento F.; Alcobendas, R; Mounzer, O; Alarcón, J.; Nicolás, E. (2010). Effects of regulated deficit irrigation on physiology and fruit quality in apricot trees. Spanish. Journal of Agricultural Research, 8(S2), pp. S86-S94.

Qiang Chai, Yantai Gan, Cai Zhao, Hui-Lian Xu, Reagan M. Waskom, *et al.* (2016). Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. A review. Agronomy for Sustainable Development, 36 (1), pp.3. ff10.1007/s13593-015-0338-6

Quiñones, A.; Martínez-Alcántara, B.; Primo-Millo, E.; Legaz, F. (2007) Fertilización de los cítricos en riego a goteo (I): N, P y K. Levante Agrícola 389: 380-385.

Quiñones, A.; Martínez-Alcántara, B.; San-Francisco, S.; García-Mina, J.M. Legaz, F. (2011), Methyl Xanthine as a potential alternative to Gibberellic acid in enhancing fruit set and quality in clementine citrus trees in Spain. Experimental Agricultural, 47(1), pp. 159–171, doi:10.1017/S0014479710000906.

Quiñones, A.; Martínez-Alcántara, B.; Primo-Millo, E.; Legaz, F. (2012). Fertigation: Concept and application in citrus. Advances in citrus nutrition. Springer, Dordrecht. 281-301.

Rahman, M.; Islam, M.; Hasanuzzaman, M. (2008). Study of Effective Rainfall for Irrigated Agriculture in South-Eastern Part of Bangladesh. World Journal of Agricultural Sciences 4 (4): 453-457.

Rodríguez Sinobas, L; Gil Rodríguez, M. (2012) A Review of Subsurface Drip Irrigation and Its Management. Chapter 10 In Water Quality, Soil and Managing Irrigation of Crops. Ed. Intech. doi: 10.5772/30702.

Romero, P.; Botia, P. & Garcia, F. (2004). Effects of regulated deficit irrigation under subsurface drip irrigation conditions on water relations of mature almond trees. Plant and Soil, 260, pp. 155-168.

Ruiz-Sánchez, M.C.; Torrecillas, A.; Pérez-Pastor, A. & Domingo, R. (2000). Regulated deficit irrigation in apricot trees. Acta Horticulturae, 537, pp. 759–766.

Sanchis-Ibor, C.; Ortega-Reig, M.; Guillem-García, A.; Carricondo, J.M.; Manzano-Juárez, J.; García-Mollá, M.; Royuela, Á. (2021). Irrigation post-modernization. Farmers envisioning irrigation policy in the region of Valencia (Spain). Agriculture, 11: 317.

Servicio de Tecnología del riego (2024) Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias. http://riegos.ivia.es/ (acceso el 05 de junio de 2024).

Thompson, R.; Delcour, I.; Berckmoes, E.; Stavridou. E (2018) Reducing Environmental Impact: Nutrient Removal and Recovery. In The Fertigation Bible. FERTINNOWA and the European Union's Horizon Research and Innovation Program.

Tognetti, R.; d'Andria, R.; Morelli, G.; Alvino, A. (2005). The effect of deficit irrigation on seasonal variations of plant water use in Olea europaea L. Plant and Soil, 273, pp. 139-155.

Ucar, Y.; Koci.ecka, J.; Liberacki, D.; Rolbiecki, R. (2023). Analysis of CropWater Requirements for Apple Using Dependable Rainfall. Atmosphere 14, 99. https://doi.org/10.3390/atmos14010099.

Unión Europea. (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas. Diario Oficial de la Unión Europea, L 327/1. Consultado en https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua.html el 10/03/2024.

Velez, J.E.; Intrigliolo, D.S.; Castel, J.R. (2007) Scheduling deficit irrigation of citrus trees with maximum daily trunk shrinkage agricultural water management 90, pp. 197-204.

Volschenk, T. (2020). Water use and irrigation management of pomegrate trees – a review. Agricultural water management 241: 106375.

Xu, H.; Yang, R.; Song, J. (2021). Agricultural Water Use Efficiency and Rebound Effect: A Study for China. Int J Environ Res Public Health 18(13): 7151. doi: 10.3390/ijerph18137151

4.2. Requerimientos y programación del riego de los frutos rojos en la provincia de Huelva. Uso del pronóstico meteorológico

Pedro Gavilán* y Natividad Ruiz

Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Centro "Alameda del Obispo"

* pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es

Índice

1. Introducción 344
2. Requerimientos de riego de los frutos rojos 345
3. Estimación de la evapotranspiración de cultivo de los frutos rojos. Programación del riego 346
   3.1. Evapotranspiración de referencia en invernadero 347
   3.2. Coeficientes de cultivo de los frutos rojos. Evapotranspiración de cultivo 350
   3.3. Riego bruto y tiempo de riego. Duración del pulso de riego 353
4. Herramientas digitales para la programación del riego de los frutos rojos 356
5. Validación de la metodología de programación del riego de los frutos rojos 357
   5.1. Riego aplicado y producción de los cultivos 357
   5.2. Indicadores de comportamiento del riego 358
6. Conclusiones 358

Resumen

Este capítulo ofrece una revisión detallada de la programación del riego de los frutos rojos en la provincia de Huelva, haciendo uso del pronóstico meteorológico proporcionado por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). La programación está basada en la metodología FAO de cálculo de las necesidades de agua de los cultivos. Se describe el procedimiento para calcular la evapotranspiración de referencia en invernadero y se proponen coeficientes de cultivo específicos para los frutos rojos de la provincia de Huelva, los cuales han sido derivados de experiencias locales o adaptados a las condiciones regionales. Además, se incluye un ejemplo práctico que ilustra el cálculo del tiempo de riego para un cultivo de fresas en la provincia de Huelva utilizando los datos de pronóstico meteorológico de la AEMET. Se introduce la aplicación Riego Berry, una herramienta digital que ofrece recomendaciones personalizadas de riego para los cultivos de fresa, frambuesa y arándano en la provincia de Huelva. Por último, se presentan los resultados de la validación de este método de programación en fincas comerciales, junto con indicadores de comportamiento del riego, tales como la eficiencia y la productividad del agua de riego en los cultivos de frutos rojos.

1. Introducción

El desarrollo del cultivo de frutos rojos ha propiciado el notable crecimiento económico de la provincia de Huelva, consolidándola como una de las agriculturas más prósperas de España. Si bien la producción de fresas ha encabezado este proceso, en los últimos cuatro años, los cultivos de frambuesas y arándanos han experimentado un crecimiento continuo. Según datos del Observatorio de Precios y Mercados de la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible, la superficie dedicada al cultivo de fresas abarca aproximadamente 6700 hectáreas, seguida por el arándano y la frambuesa, con 4130 y 2120 hectáreas respectivamente (CAGPDS, 2022). No obstante, desde la década de los noventa del siglo pasado, ha surgido un debate en torno a la necesidad de conciliar la actividad agraria con la preservación del medio ambiente en esta área. Cabe destacar que el 75% de los cultivos de frutos rojos se encuentran ubicados en las proximidades del Parque Nacional de Doñana, un enclave natural de elevado valor ecológico que fue declarado Patrimonio Mundial por la UNESCO en 1994.

Los frutos rojos son cultivos bajo plástico, con sistemas de fertirrigación y riego localizado que son potencialmente métodos de riego altamente eficientes. No obstante, investigaciones recientes han revelado que la eficiencia del riego en estos cultivos en la zona, medida a nivel de parcela, es inferior a la esperada (Gavilán *et al.*, 2021). Este hecho puede atribuirse a diversos factores. En primer lugar, la predominancia de suelos arenosos, algunos con un contenido de arena superior al 90%, con una baja capacidad de retención de agua. En estas circunstancias, los agricultores pueden no percibir adecuadamente la humedad del suelo, lo que conduce a un exceso de riego. Además, las decisiones de riego suelen basarse en la experiencia personal de los agricultores, la observación de las condiciones meteorológicas y los indicadores visuales del suelo y la planta. Con frecuencia, el riego se lleva a cabo sin un monitoreo adecuado del estado hídrico del suelo o de la planta. La programación del riego utilizando un balance hídrico en el suelo y datos meteorológicos sigue siendo poco común. Por otro lado, los costes asociados a la fertirrigación son relativamente bajos en comparación con otros costes de producción, representando entre un 3% y un 6% del total de los costes de cultivo (CAGPDS, 2021; CAPADR, 2023). Por consiguiente, en muchos casos, se presta poca atención al ahorro de agua y fertilizantes. Sin embargo, el exceso de riego no solo afecta la eficiencia del riego y los costes de producción, sino que también provoca la contaminación difusa. En años recientes, una parte significativa de las tierras destinadas al cultivo de frutos rojos ha sido declarada como vulnerable a la contaminación por nitratos (CAGPDS, 2020). Este hecho subraya la importancia de implementar prácticas de riego más eficientes y sostenibles para mitigar los impactos negativos en el medio ambiente.

Los sistemas de riego requieren una gestión racional, fundamentada en una programación del riego mediante el balance de agua en el suelo y/o la monitorización del sistema suelo-planta-atmósfera, con el propósito de mitigar los problemas ambientales. A pesar de los avances en las técnicas de monitorización, el método de balance hídrico en el suelo sigue siendo el más utilizado para la programación de riegos (Fereres *et al.,* 2003). Este método se basa en la metodología de la FAO para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos o evapotranspiración (ETc), que estima la evapotranspiración de referencia (ETo) y la ajusta mediante un coeficiente de cultivo (Kc) (Allen *et al*., 2006). Dicho método ha demostrado su eficacia en cultivos hortícolas en invernadero en la provincia de Almería (Bonachela *et al.,* 2006), permitiendo alcanzar ahorros de agua de hasta el 40% sin comprometer los rendimientos en

cultivos hortícolas (De Pascale *et al.,* 2011) y frutos rojos (Gavilán *et al.,* 2024) (Tabla 1). Lamentablemente, la difusión del conocimiento y, especialmente, la transferencia de tecnología, aún deben ser mejoradas, ya que muchos productores disponen de las herramientas necesarias para optimizar los retornos económicos en sus explotaciones agrícolas mientras preservan el medio ambiente.

Diversas metodologías se han empleado para calcular la evapotranspiración de referencia (ETo). Entre las más comunes se encuentran aquellas basadas en el uso de datos meteorológicos históricos o de días previos (Hanson, 1996; Hill y Allen, 1996; Hanson y Kaita, 1999), mientras que otras se valen de pronósticos meteorológicos (Cabelguenne *et al.*, 1997; Wilks y Wolfe, 1998; Gowing y Ejieji, 2001; Cai *et al.,* 2007). Los agricultores pueden adoptar fácilmente calendarios de riego fundamentados en series históricas, una técnica que ha demostrado su eficacia en condiciones de baja variabilidad interanual de la ETo y ausencia de precipitaciones, como ocurre en los cultivos en invernadero del sudeste de España (Fernández, 2000).

Los servicios de asesoramiento al regante (SAR) generalmente emplean estimaciones de ETo basadas en datos meteorológicos medidos, obtenidos de redes de estaciones meteorológicas públicas, para generar calendarios de riego semanales (Ortega *et al.,* 2005). No obstante, el uso del pronóstico meteorológico es menos frecuente, aunque resulta especialmente útil en cultivos hortícolas con sistemas radiculares superficiales, frecuentemente cultivados en suelos arenosos, que requieren riegos de muy alta frecuencia (Duce *et al.,* 2000; Luo *et al.,* 2014). Se han aplicado programas de riego basados en este enfoque a diversos cultivos (Cabelguenne *et al.,* 1997; Wilks y Wolfe, 1998; Gowing y Ejieji, 2001).

En este capítulo se abordan los requerimientos de riego específicos para los cultivos de frutos rojos, así como los fundamentos para la programación del riego utilizando el pronóstico meteorológico. Se presentarán también los indicadores de funcionamiento del riego, tales como la eficiencia y productividad del agua de riego, junto con herramientas digitales de programación de riegos para los cultivos de frutos rojos, como es el caso de Riego Berry. Finalmente, se ofrecen algunos resultados de la aplicación de esta metodología en condiciones reales de campo.

Tabla 1. Aumento relativo de la eficiencia del riego y reducción del volumen aplicado para diferentes estrategias de programación de riegos (de Pascale *et al.,* 2011)

Estrategia de riego	Eficiencia relativa de riego	Disminución del volumen de riego aplicado (%)
Riego tradicional	1,00	0
Datos meteorológicos históricos	1,30	23
Medida de la humedad del suelo	1,40-1,50	29-33
Datos meteorológicos reales	1,60	38
Balance de agua en el suelo	1,70	41
Cámara de presión	1,75	43
Balance de agua y medida de la humedad del suelo	2,15	53

2. Requerimientos de riego de los frutos rojos

Las necesidades hídricas de un cultivo se determinan en base a las cantidades de agua requeridas para mantener una tasa óptima de evapotranspiración (ETc). Estas necesidades se calculan considerando la diferencia entre la ETc y la precipitación efectiva, ajustadas por las

variaciones en el contenido de humedad del suelo. La ETc representa las necesidades netas del cultivo, mientras que las necesidades brutas (a las que nos referiremos posteriormente como riego bruto) incluyen el agua adicional aplicada para solventar, si fuera necesario, problemas derivados de la falta de uniformidad del sistema de riego y el lavado de sales. Dado que el cultivo de frutos rojos se lleva a cabo en invernadero, la precipitación no debe ser tomada en consideración. Además, el uso de riego localizado de alta frecuencia permite mantener el suelo en condiciones cercanas a su capacidad de campo, lo que nos permite considerar que las necesidades de agua del cultivo son equivalentes a la ETc (Gallardo *et al.*, 2013).

En la Tabla 2 se presentan los valores medios estacionales de la evapotranspiración del cultivo (ETc) de los frutos rojos cultivados en invernaderos del tipo macrotúnel en la provincia de Huelva. Estos datos han sido determinados experimentalmente mediante el uso de lisímetros de drenaje en ensayos realizados tanto en fincas comerciales como en la Finca Experimental del IFAPA "El Cebollar" en Moguer (Huelva). Los valores de la ETc varían en un rango que va desde 171 mm (para la frambuesa floricane de ciclo corto, con una duración de ciclo de primavera de 5 meses) hasta 688 mm (para el arándano de 5 años con un ciclo de 12 meses). Para la fresa, los valores de la ETc oscilan entre 250 mm (ciclo de 200 días) y 372 mm (ciclo de 240 días). Se observa que la frambuesa floricane muestra el valor más bajo, mientras que el arándano exhibe el valor más alto. Como regla general, se aprecia que la ETc tiende a aumentar con la longitud del ciclo en los cultivos de frambuesa y fresa, así como con la edad de la plantación en el caso del arándano (Gavilán *et al.*, 2024).

Tabla 2. Evapotranspiración de cultivo (ETc), determinada experimentalmente, y riego (R) de los frutos rojos cultivados en suelo en la provincia de Huelva (Gavilán *et al.,* 2024)

Cultivo		Longitud del ciclo (días)	ETc (mm)	R (mm)
Frambuesa Primocane (1ª Postura)		225	262	310
		260	426	520
Frambuesa Floricane (2ª Postura y de caña)		150	171	200
		165	220	250
		220	241	330
Fresa		200	250	360
		220	296	450
		240	372	550
Arándano	1 año	365	308	410
	2 años		410	550
	3 años		544	590
	4 años		590	630
	5 años		688	740

3. Estimación de la evapotranspiración de cultivo de los frutos rojos. Programación del riego

La estimación de la evapotranspiración del cultivo (ETc) puede realizarse mediante la metodología desarrollada por la FAO, descrita en el Manual de Riego y Drenaje Número 56 (Allen *et al.,* 2006). Esta metodología ha sido adaptada para su aplicación en los cultivos en invernadero del Mediterráneo español (Bonachela *et al.,* 2006) y específicamente para los cultivos de frutos rojos en la provincia de Huelva (Gavilán *et al.,* 2024). Se fundamenta en la estimación de la

evapotranspiración de referencia (ETo), que evalúa el impacto del clima en la demanda de agua del cultivo, y se calcula multiplicando la ETo por un coeficiente de cultivo (Kc) particular de cada cultivo y su desarrollo (Ecuación 1).

$$ETc = ETo \ x \ Kc \ (Ec. 1)$$

En este capítulo se describe la metodología para calcular la evapotranspiración del cultivo (ETc) en condiciones óptimas, es decir, cuando el cultivo no se ve afectado por estrés hídrico, condiciones ambientales desfavorables, plagas o enfermedades.

3.1. Evapotranspiración de referencia en invernadero

El cultivo de frutos rojos puede realizarse al aire libre en ciertos momentos de su ciclo. Para estimar la evapotranspiración de referencia (ETo) en estas condiciones se utilizan diversos métodos. El método recomendado por la FAO es la ecuación estandarizada de Penman-Monteith FAO 56 (Allen *et al.*, 2006). Otros métodos, como la ecuación de Hargreaves, que necesita únicamente la temperatura del aire para el cálculo, o el uso del tanque evaporimétrico Clase A, están siendo cada vez menos utilizados. Esto se debe a la disponibilidad de redes de estaciones meteorológicas automáticas, como la Red SIAR (www.siar.es), que proporcionan diariamente datos abiertos de diversas variables meteorológicas medidas y estimaciones de la ETo mediante el método de Penman-Monteith FAO 56 (Figura 1).

Figura 1. Estaciones meteorológicas de la Red SIAR (www.siar.es)

La evapotranspiración de referencia en invernadero (ETo inv) está principalmente influenciada por la radiación solar y tiende a ser inferior a la ETo medida al aire libre, debido a la reducción de la radiación solar dentro del invernadero en comparación con el exterior (hasta un 30%), así como a la baja velocidad del viento (inferior a 0.5 m/s). En los invernaderos de la provincia de Almería, esta reducción de la ETo inv puede llegar hasta el 40% (Fernández, 2000), mientras que en los de la provincia de Huelva oscila entre el 20% y el 35%. La Tabla 3 presenta los valores quincenales medios, máximos y mínimos de la ETo inv, junto con los valores calculados de la ETo al aire libre utilizando la ecuación de Penman-Monteith FAO56. Estos valores han sido estimados mediante una serie histórica de 20 años de datos medidos en la estación meteorológica de Almonte (Huelva), la cual forma parte de la Red SIAR. Estadísticamente, se considera que el valor promedio puede ser superado en un 40% de los casos.

Tabla 3. Valores quincenales de ETo inv medios, máximos y mínimos, medios de ETo Penman-Monteith FAO56 y medios de radiación solar en condiciones de cielo despejado (Rso) estimados a partir de 20 años de datos meteorológicos medidos en la estación meteorológica de Almonte (Huelva)

Fecha	ETo inv (mm d^{-1})			ETo PM FAO56 (mm d^{-1})	Rso (MJ m^{-2} d^{-1})
	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Promedio
1-15 enero	0,8	1,1	0,2	1,0	10,2
16-31 enero	1,0	1,4	0,3	1,3	11,7
1-14 febrero	1,3	1,8	0,5	1,6	13,9
14-28 febrero	1,6	2,2	0,5	2,0	16,5
1-15 marzo	2,0	2,7	0,7	2,5	19,6
16-31 marzo	2,4	3,3	0,8	2,9	22,8
1-15 abril	3,1	4,0	1,3	3,7	25,9
16-30 abril	3,4	4,5	1,6	4,0	28,5
1-15 mayo	4,0	5,0	2,1	4,6	30,4
16-31 mayo	4,5	5,4	2,5	5,3	31,9
1-15 junio	5,0	5,8	3,2	6,1	32,6
16-30 junio	5,5	6,2	4,0	6,8	32,8
1-15 julio	5,8	6,5	4,7	7,5	32,4
16-31 julio	5,8	6,5	4,5	7,3	31,4
1-15 agosto	5,6	6,3	4,1	7,1	29,8
16-31 agosto	4,9	5,7	3,1	6,3	27,5
1-15 septiembre	4,1	4,8	2,6	5,4	24,8
16-30 septiembre	3,2	3,9	1,6	4,2	21,8
1-15 octubre	2,7	3,3	1,4	3,5	18,6
16-31 octubre	1,9	2,6	0,7	2,5	15,5
1-15 noviembre	1,5	2,1	0,5	1,9	12,9
16-30 noviembre	1,2	1,6	0,4	1,4	11,0
1-15 diciembre	1,0	1,3	0,3	1,1	9,9
16-31 diciembre	0,8	1,1	0,3	1,1	9,6

Según Fernández *et al.* (2010), ETo inv puede estimarse mediante un modelo basado en la radiación solar, el cual fue desarrollado específicamente para los invernaderos de Almería (Ecuaciones 2 y 3).

$$\text{Si } DDA < 220 \quad ETo\ inv = (0{,}288 + 0{,}0019\ x\ DDA)\ x\ Rs\ inv\ /\ 2{,}45\ (Ec.2)$$

$$\text{Si } DDA > 220 \quad ETo\ inv = (1{,}339 - 0{,}00288\ x\ DDA)\ x\ Rs\ inv\ /\ 2{,}45\ (Ec.3)$$

Donde DDA es el día del año, ETo inv es la evapotranspiración de referencia en invernadero (mm d^{-1}) y Rs inv es la radiación solar dentro del invernadero (MJ m^{-2} d^{-1}). El factor de conversión 2,45 es el calor latente de vaporización del agua en MJ kg^{-1}, que permite convertir la energía radiante (MJ m^{-2} d^{-1}) en su equivalente de evaporación (mm d^{-1}).

La determinación precisa de la ETo inv puede realizarse usando datos meteorológicos medidos, los cuales permiten calcular retrospectivamente la ETo inv del día anterior. Sin embargo, para una planificación anticipada del riego, es útil recurrir a pronósticos meteorológicos. En este sentido, se ha demostrado que el pronóstico de la ETo inv utilizando los servicios de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) es una herramienta valiosa. Este servicio ofrece pronósticos semanales de variables como la temperatura y humedad relativa del aire, la velocidad y

dirección del viento, la probabilidad de precipitación y el estado del cielo (Gavilán *et al.*, 2015). La Figura 2 ilustra de manera esquemática los componentes y el proceso para el cálculo tanto de la ETo inv como de la evapotranspiración del cultivo (ETc) en un invernadero de tipo macrotúnel típicamente encontrado en la provincia de Huelva. Este esquema está basado en la integración de datos meteorológicos observados y pronosticados, datos de cultivo y características del macrotúnel.

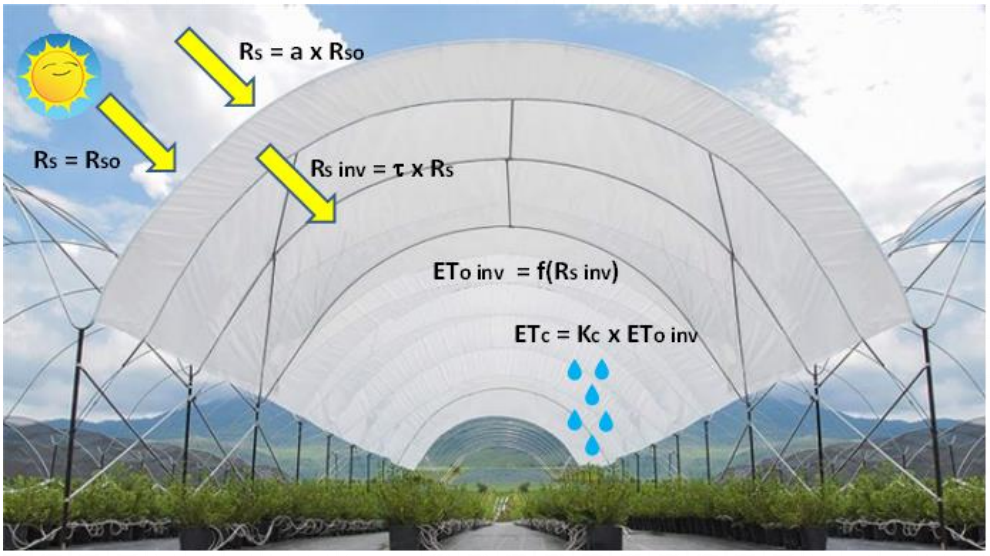


Figura 2. Esquema de los componentes y proceso para el cálculo de la ETc en un macrotúnel de frutos rojos en la provincia de Huelva

Para realizar el pronóstico de la ETo inv, en primer lugar, es necesario estimar la radiación solar en condiciones de cielo despejado en el exterior del macrotúnel (Rso) (Ecuación 4):

$$Rso \ = \ (0{,}75 \ + \ 2 \ x \ 10 - 5 \ z) \ x \ Ra \ (Ec. 4)$$

Donde z representa la altura de la finca sobre el nivel del mar y Ra es la radiación extraterrestre (MJ m^{-2} d^{-1}), la cual depende exclusivamente de la latitud y el día del año. La radiación extraterrestre puede ser estimada de acuerdo con las ecuaciones recomendadas en el Manual FAO 56 (Allen *et al.*, 2006). Estas ecuaciones proporcionan una base sólida para la estimación precisa de Ra, considerando los parámetros fundamentales de latitud y día del año. Con el fin de facilitar el cálculo, se incluyen en la última columna de la Tabla 3 los valores medios quincenales de Rso en el municipio de Almonte (Huelva).

Para estimar la radiación solar en el exterior del invernadero (Rs ext) a partir de los pronósticos proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), los valores de cobertura del cielo obtenidos de la predicción se convierten en valores numéricos utilizando los coeficientes recomendados por Cai *et al.* (2007). Este proceso permite cuantificar la cantidad de radiación solar que llega al exterior del invernadero en función de las condiciones atmosféricas previstas. Rs ext se estima entonces como el producto de un factor "a" por la radiación solar en condiciones de cielo despejado, según la siguiente ecuación (Ecuación 5):

$$Rs \ ext \ = \ a \ x \ Rso \ (Ec. 5)$$

Donde Rs ext representa la radiación solar en el exterior del invernadero (MJ m^{-2} d^{-1}), Rso es la radiación solar en condiciones de cielo despejado (MJ m^{-2} d^{-1}), a es el coeficiente que tiene en cuenta la cobertura del cielo, obtenido a partir de la predicción de AEMET y los coeficientes propuestos por Cai *et al.* (2007) (Tabla 4).

Tabla 4. Valores del factor de conversión (a) del estado del cielo del pronóstico de AEMET para la estimación de la Rs ext usando la Ecuación 5

Estado del cielo	Despejado	Nubes altas	Poco nuboso	Intervalos nubosos	Nuboso	Muy nuboso	Cubierto
a	1	0,95	0,90	0,80	0,60	0,50	0,30

La radiación solar dentro del invernadero (Rs inv) se calcula como el producto de la radiación solar en el exterior del invernadero (Rs ext) por la transmisividad del plástico (τ), que representa la relación entre la radiación solar dentro y fuera del invernadero (Ecuación 6). Es recomendable utilizar valores de τ iguales a 0,80 para cubiertas de polietileno de 400 galgas de espesor y valores de 0,75 para polietileno de 600 galgas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que estos valores pueden reducirse entre un 5% y un 10% si se emplea una cobertura plástica de segundo año.

$$Rs\ inv\ =\ Rs\ ext\ x\ \tau (Ec.6)$$

A continuación, vamos a calcular la ETo inv en una finca del municipio de Almonte, la semana del 15 de abril, con un pronóstico meteorológico de intervalos nubosos (a = 0,80), si utilizamos un plástico de primer año y 400 galgas de espesor.

Usando la Tabla 3 sabemos que Rso = 25,9 MJ m^{-2} d^{-1}

La radiación solar fuera del invernadero, de acuerdo con la Ecuación 5, será (a = 0,8):

$$Rs\ ext = 0{,}8 \times 25{,}9 = 20{,}7\ MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$$

La radiación solar dentro del invernadero será (τ = 0,80) (Ecuación 6):

$$Rs\ inv = 0{,}8 \times 20{,}7 = 16{,}6\ MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$$

Finalmente, la evapotranspiración de referencia dentro del invernadero será, usando la Ecuación 1 y considerando que el 15 de abril se corresponde con el DDA = 105:

$$ETo\ inv = (0{,}288 + 0{,}0019 \times 105) \times 16{,}6/2{,}45 = 3{,}3\ mm\ d^{-1}$$

El valor de ETo inv promedio de la Tabla 3 para la segunda quincena de abril es igual a 3,1 mm d^{-1}. No difiere en más de un 6% del valor calculado. Por tanto, podemos tomar el valor promedio de la Tabla 3 para realizar un avance de la programación del riego al inicio de la campaña con una incertidumbre del 5%.

3.2. Coeficientes de cultivo de los frutos rojos. Evapotranspiración de cultivo

En la Tabla 5 se presentan diversos valores de Kc para los cultivos de frutos rojos en función de su desarrollo vegetativo. Estos valores han sido recopilados a partir de la literatura científica y

adaptados o determinados experimentalmente en la provincia de Huelva, utilizando lisímetros de drenaje. En la medida de lo posible, se han considerado los coeficientes de cultivo basados en el desarrollo del cultivo, medido a partir de su porcentaje de cobertura (Pc). La medición del Pc puede realizarse de manera precisa utilizando aplicaciones móviles de acceso libre, como Canopeo® (Patrignani y Ochsner, 2015), que permiten estimar el porcentaje de cobertura vegetal a partir de fotografías tomadas en campo. En cualquier caso, se recomienda el uso de coeficientes de cultivo que consideren el porcentaje de cobertura, ya que esta medida refleja de manera directa el desarrollo y la densidad de plantación del cultivo.

Para el cultivo de la fresa, el Manual FAO 56 ofrece una guía sobre los Kc correspondientes a las tres fases de crecimiento: etapa inicial, media y final del cultivo, con valores de 0,3, 0,8 y 0,7, respectivamente (Figura 3). Sin embargo, Hanson y Bendixen (2004), para el estado de California (EEUU), recomiendan valores máximos de Kc de 0,70 para porcentajes máximos de cobertura que varían entre el 65% y el 75%. En la provincia de Huelva, Lozano *et al*. (2016) llevaron a cabo estudios para determinar un Kc específico en función del porcentaje de cobertura para el cultivo de fresa (Tabla 5). Según sus investigaciones, este coeficiente comienza en un valor mínimo de 0,15 en el momento de la plantación y aumenta gradualmente hasta alcanzar un valor máximo superior a 0,90 hacia junio, al final del ciclo de cultivo, siempre que el porcentaje de cobertura alcance un máximo del 80% (Figura 4).

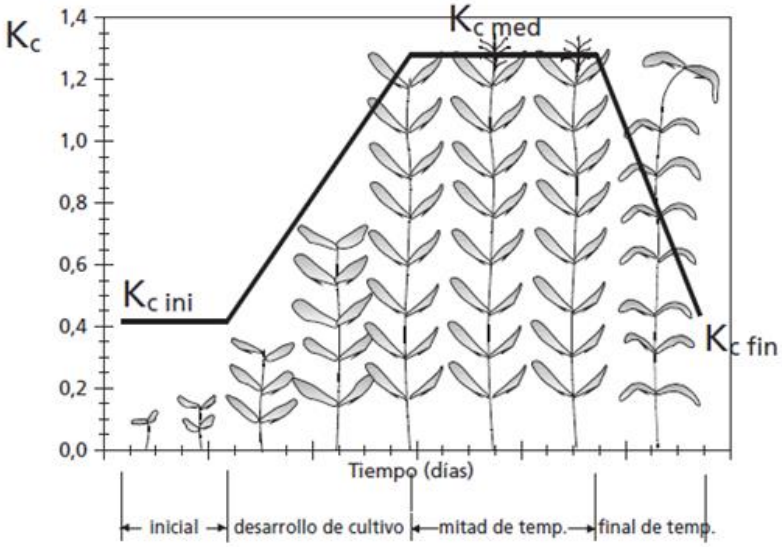


Figura 3. Curva generalizada del coeficiente del cultivo de la FAO, correspondiente al procedimiento del coeficiente único del cultivo (Allen *et al.*, 2006)

Para el cultivo de la frambuesa, se recomienda emplear el coeficiente de cultivo desarrollado por el *Bureau of Reclamation of Pacific Northwest Region* de Estados Unidos, como sugieren Black *et al*. (2007). Este coeficiente de cultivo parte de un valor inicial de 0,15 después de la plantación o la poda, alcanza su punto máximo de 1 durante la floración y luego disminuye hasta aproximadamente 0,80 durante la senescencia del cultivo. Es importante destacar que este coeficiente de cultivo debe ser ajustado posteriormente en función del porcentaje de cobertura (Pc). Varios estudios, incluyendo investigaciones realizadas por Lozano et al. (2018), Gavilán *et al.* (2019) y Uribe (2013), han propuesto correcciones específicas para adaptar el coeficiente de

cultivo a las condiciones locales y al estado de desarrollo de la frambuesa. Además, se han propuesto coeficientes de cultivo específicos en función del porcentaje de cobertura para la frambuesa de vara o segunda postura de la frambuesa remontante, según investigaciones realizadas por Uribe (2013) y Lozano *et al.* (2018).

En el caso del cultivo del arándano, se dispone de varias opciones para determinar el Kc. Por un lado, Holzapfel *et al.* (2015) sugieren utilizar un Kc en función del porcentaje de cobertura del cultivo, el cual alcanza un valor máximo de 0,75 a 0,80. Este enfoque tiene en cuenta la densidad de plantación y el desarrollo vegetativo del arándano, adaptando el Kc a las condiciones específicas del cultivo. Por otro lado, Ortega-Farias *et al*. (2021) proponen un coeficiente de cultivo basado en el desarrollo vegetativo del arándano, independiente de la cobertura del cultivo. Según esta propuesta, el Kc alcanza un valor máximo de 0,75 (Tabla 5).

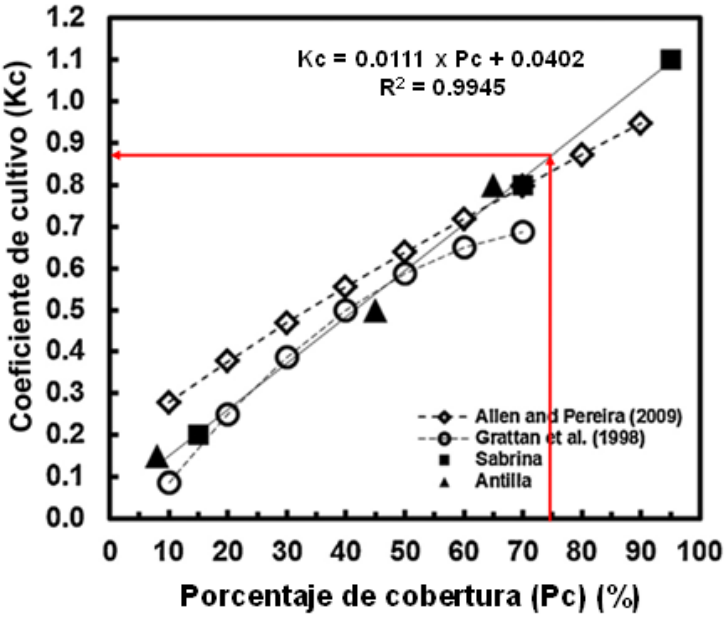


Figura 4. Relación entre el coeficiente de cultivo (Kc) y el porcentaje de cobertura (fc) obtenido por Lozano *et al.* (2016), Allen y Pereira (2009) y Grattan *et al.* (1998)

Para seguir con el ejemplo, vamos a calcular la ETc de un cultivo de fresa, siendo la ETo inv la calculada en el ejemplo anterior (3,3 mm d-1). El cultivo tiene un porcentaje de cobertura, medido con Canopeo, del 68%. Por tanto, de acuerdo con Lozano *et al.* (2016), Kc tomará un valor de:

$$Kc = 0{,}0111 \times Pc + 0{,}0402 = 0{,}0111 \times 68 + 0{,}0402 = 0{,}75 + 0{,}0402 = 0{,}79 \approx 0{,}80$$

En este caso, el valor coincide por el propuesto en el Manual FAO56, dado que en esa fecha el cultivo se encuentra en su fase media.

La ETc, o necesidades netas del cultivo, será:

$$ETc = ETo\ inv \times Kc = 3{,}3 \times 0{,}80 = 2{,}64\ mm\ d^{-1}$$

Tabla 5. Coeficientes de cultivo de los frutos rojos (Pc: porcentaje de cobertura). En negrita se muestran los Kc aconsejados usando Pc

Cultivo	Kc	Referencia
Fresa	$K_{cb\ ini}$ = 0,3 $K_{cb\ med}$ = 0,8 $K_{cb\ fin}$ = 0,7	Allen *et al*. (2006) (Manual FAO 56)
	$K_{c\ ini}$ = 0,15 $K_{c\ fin}$ = 0,70	Hanson y Bendixen (2004)
	K_c = 0,0111 x P_c + 0,0402 **K_c > 0,15**	**Lozano *et al*. (2016)**
Frambuesa remontante	$K_{c\ Agrimet\ ini}$ = 0,15 (Plantación o poda) $K_{c\ Agrimet\ med}$ = 1,00 (Plena floración) $K_{c\ Agrimet\ fin}$ = 0,80 (Senescencia)	Black *et al*. (2008)
	$K_{c\ ini}$ = 0,4 $K_{c\ med}$ = 1,2 $K_{c\ fin}$ = 0,75	Van der Gulik y Nivall (2001)
	K_c = $K_{c\ Agrimet}$ x F_c **F_c = 0,92 x P_c/100 + 0,187** **K_c > 0,15**	**Uribe (2013)**
Frambuesa de vara	**K_c = 0,0178 x P_c + 0,0236** **K_c > 0,15**	**Lozano *et al.* (2018)**
Mora	$K_{cb\ ini}$ = 0,2 $K_{cb\ med}$ = 1,0 $K_{cb\ fin}$ = 0,4	Allen *et al*. (2006) (Manual FAO 56)
Arándano	**K_c = 1,28 x P_c/100 + 0,11** **K_c > 0,15**	**Holzapfel *et al*. (2015)**
	$K_{c\ ini}$ = 0,10 $K_{c\ med1}$ = 0,30 (Inicio floración) $K_{c\ med2}$ = 0,50 (Envero) $K_{c\ fin}$ = 0,75 (Inicio cosecha)	Ortega-Farias *et al*. (2021)
	$K_{c\ ini}$ = 0,4 $K_{c\ med}$ = 1,0 $K_{c\ fin}$ = 0,75	Van der Gulik y Nivall (2001)

3.3. Riego bruto y tiempo de riego. Duración del pulso de riego

Como se mencionó anteriormente, los riegos de alta frecuencia ofrecen una solución simplificada al problema del balance de agua en el suelo al ignorar la capacidad de almacenamiento de agua en el mismo. En esta estrategia de riego, el objetivo es mantener el contenido de agua en el suelo cercano a la capacidad de campo, lo que implica reponer la ETc acumulada desde el último riego.

El cálculo del riego bruto (Rb) se realiza dividiendo la evapotranspiración del cultivo (ETc) por la eficiencia de aplicación del riego (Ea) (Ecuación 7).

$$Rb = \Sigma(ETo\ inv\ x\ Kc)\ /\ Ea = \Sigma ETc\ /\ Ea\ (Ec.7)$$

Los sistemas de riego localizado están diseñados para alcanzar elevadas eficiencias, del 90 al 95%. Sin embargo, eficiencias menores son frecuentes en el cultivo de frutos rojos, sobre todo cuando se dan riegos muy por encima de las necesidades de agua del cultivo y no se dan riegos

por pulsos (Figura 5) (Gavilán *et al.*, 2019). La eficiencia de un riego localizado de alta frecuencia depende, entre otros factores, del tipo de suelo y de la uniformidad de distribución del sistema de riego (UD), que, a su vez, depende de la duración del pulso de riego. Riegos de larga duración y baja frecuencia pueden generar estrés hídrico en la planta debido a la baja capacidad de almacenamiento de los suelos arenosos. Por el contrario, riegos de muy corta duración y muy alta frecuencia mantienen una humedad constante en determinados puntos de la parcela, pero tienen una baja UD, lo que puede generar déficit de riego en algunos puntos de la parcela. Este déficit solo puede ser resuelto aumentando el tiempo de riego, lo que provoca una caída de la eficiencia del riego.

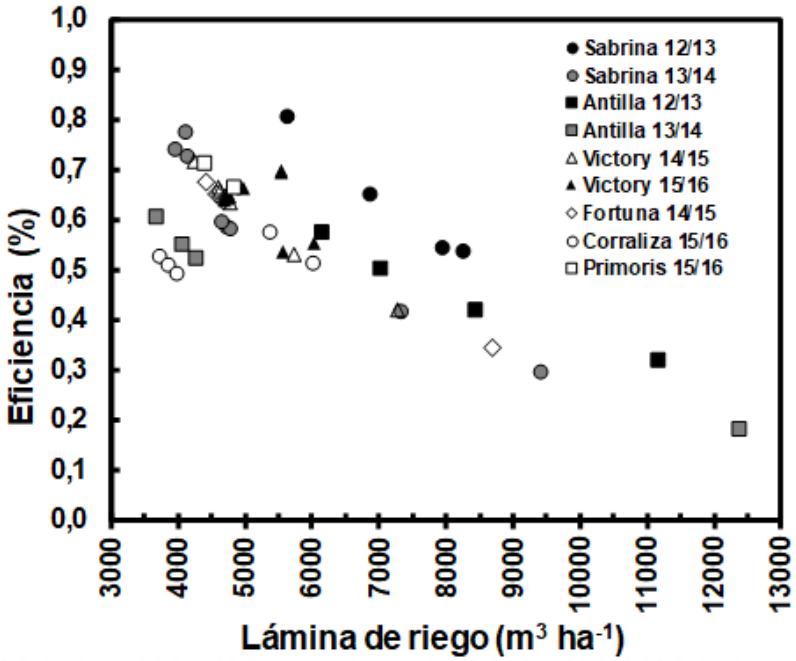


Figura 5. Eficiencia del riego medida en 38 parcelas de fresa de la provincia de Huelva entre las campañas 2012/13 y 2015/16 en seis variedades de fresa (Gavilán *et al.*, 2019)

La uniformidad de distribución (UD) de un sistema de riego localizado bien diseñado se ve principalmente influenciada por el caudal de la cinta de riego y la duración del pulso de riego, como se detalla en la Tabla 6 y se ilustra en la Figura 6. En todos los casos, un aumento en la duración del riego conduce a una mejora en la UD. Por ejemplo, al emplear una cinta de riego con un caudal de 5 litros por hora por metro de longitud, se establece que un tiempo de riego igual o superior a 10 minutos representa el umbral mínimo necesario para alcanzar una UD superior al 85%. Es importante destacar que la UD del sistema de riego puede disminuir significativamente cuando se aplican riegos de corta duración. Por ejemplo, un riego de menos de 5 minutos puede reducir la UD por debajo del 80%, lo que inevitablemente afecta la eficiencia de aplicación del riego. Según lo recomendado por Lozano *et al.* (2020), se aconsejan valores específicos de eficiencia de aplicación del riego (Ea) dependiendo de la duración del pulso de riego. Para pulsos de riego de 5, 10, 15 y 20 minutos de duración, se recomiendan valores de Ea del 60%, 75%, 80% y 85%, respectivamente, cuando se usa una cinta de riego de 5 l h^{-1} m^{-1} (Tabla 6 y Figura 7). Tanto los valores de UD como de Ea disminuyen cuando el sistema se instala en terrenos en pendiente.

Tabla 6. Uniformidad de distribución (UD) y eficiencia de aplicación del riego (Ea) sin déficit para cintas de riego de caudal 2,5, 3,8 y 5 l h^{-1} m^{-1}, situadas en terrenos llanos, en función de la duración del pulso de riego (Gavilán *et al.*, 2015; Lozano *et al.*, 2020). Entre paréntesis se dan los valores de la UD y Ea para cintas de riego instaladas en terrenos con pendiente

Caudal de la cinta (l h^{-1} m^{-1})								
2,5			3,8			5		
Tiempo de riego (min)	UD (%)	Ea (%)	Tiempo de riego (min)	UD (%)	Ea (%)	Tiempo de riego (min)	UD (%)	Ea (%)
5	76 (60)	57 (50)	4	79 (60)	57 (50)	3	66	<50
10	86 (78)	77 (57)	7	87 (78)	77 (57)	5	79 (60)	57 (<50)
20	90 (83)	83 (76)	13	92 (83)	83 (76)	10	86 (78)	77 (57)
30	93 (83)	85 (78)	20	94 (86)	85 (78)	15	91 (83)	83 (76)
						20	93 (86)	85 (78)

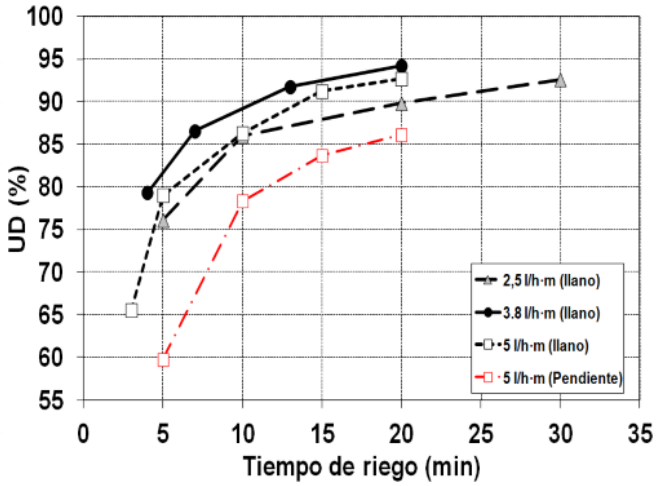


Figura 6. Uniformidad de distribución (UD) del riego localizado en función de la duración del pulso de riego para cintas de 2,5, 3,8 y 5 l h^{-1} m^{-1}. En rojo se dan los valores para cintas de riego de 5 l h^{-1} m^{-1} en terrenos con pendiente (Gavilán *et al.*, 2015)

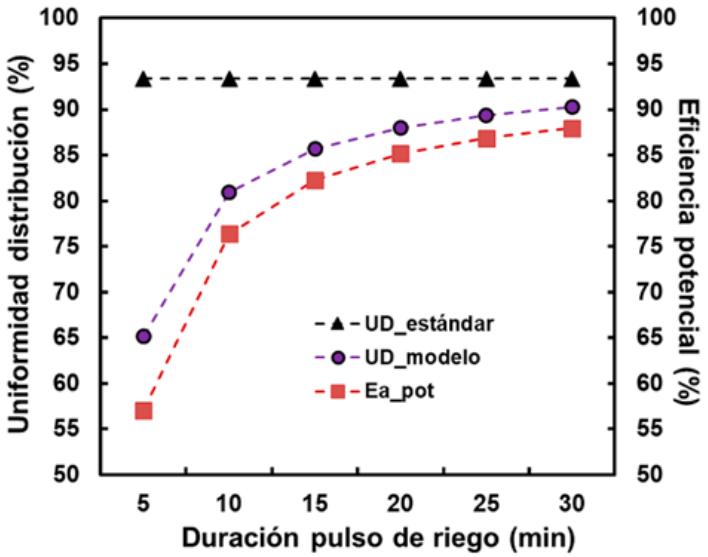


Figura 7. Uniformidad de distribución (UD) del cuarto menor estándar (UD_estándar), UD calculada considerando todo el tiempo de riego (UD_modelo) y eficiencia de aplicación potencial (Ea_pot) en función de la duración del pulso de riego (Lozano *et al.*, 2020).

Continuando con el ejemplo anterior, vamos a calcular el riego bruto y la duración del riego para un cultivo de fresa, considerando que la ETc = 2,6 mm d^{-1}.

Suponemos una eficiencia de aplicación del riego del 80%, correspondiente a pulsos de 15 minutos de duración, que después habrá que comprobar cuando hagamos el reparto del tiempo de riego en diferentes pulsos. El riego bruto (Rb) será, de acuerdo con la Ecuación 7:

$$Rb = ETc/Ea = 2{,}64/0{,}80 = 3{,}30 \text{ mm } d^{-1} = 3{,}30 \text{ l } m^{-2} \, d^{-1}$$

A continuación, debemos calcular la capacidad de nuestro sistema de riego (CSR), expresada como lámina de riego (mm h^{-1}), considerando que nuestro cultivo de fresa tiene lomos separados a 1,10 m y se usa una cinta de riego por lomo de caudal 5 l h^{-1} m^{-1} (situación típica de un cultivo de fresa en la provincia de Huelva):

CSR (mm h^{-1}) = Nº de cintas x caudal de la cinta/separación entre lomos = 1 x 5/1,10 = 4,54 l m^{-2} h^{-1} = 4,54 mm h^{-1}

Por tanto, el tiempo de riego (Tr) será:

$$Tr = Rb/Cs = 3{,}30 \text{ mm } d^{-1}/4{,}54 \text{ mm } h^{-1} = 0{,}73 \text{ h } d^{-1} = 0{,}73 \times 60 \text{ min } d^{-1} = 43{,}8 \text{ min } d^{-1} \approx 44 \text{ min } d^{-1}$$

Considerando las recomendaciones anteriores, deberíamos dar 3 pulsos de 15 minutos de duración. Como el pulso de riego elegido ha sido de 15 minutos, la eficiencia de riego elegida del 80% ha sido adecuada, de acuerdo con lo expuesto anteriormente (Tabla 6).

4. Herramientas digitales para la programación del riego de los frutos rojos

Como consecuencia de los trabajos desarrollados por el IFAPA en el riego de los frutos rojos, se ha desarrollado la App Riego Berry (Gavilán *et al.*, 2024). Riego Berry es una App pública y gratuita que proporciona una interfaz cómoda e intuitiva para realizar las recomendaciones de riego de los cultivos de fresa, frambuesa y arándano en la provincia de Huelva. La estrategia de riego está orientada a obtener la máxima producción, optimizando el consumo de agua, de forma que el cultivo no sufra estrés hídrico. Riego Berry se basa en 10 años de trabajos experimentales en fincas de productores de la provincia de Huelva y en la Finca Experimental de El Cebollar (IFAPA) en Moguer. Los ensayos se han realizado sobre cultivos de fresa, frambuesa y arándano. Esto avala su uso en condiciones de producción comercial. La App está basada en la metodología FAO de programación de los riegos, utilizando el pronóstico meteorológico de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) para la estimación de la ETo. Riego Berry para Android está disponible en Play Store y puede ser descargada de forma gratuita (https://play.google.com/store/apps/details?id=com.riegoberry.app). También está disponible la versión para IOS en la URL https://apps.apple.com/es/app/riego-berry/id1537564663. Más detalles sobre su funcionamiento y prestaciones pueden consultarse en su Guía de Uso (Gavilán *et al.,* 2021). Desde su puesta en servicio a finales del año 2020, la aplicación cuenta ya con 600 usuarios que han programado el riego de más de 1.200 parcelas.

5. Validación de la metodología de programación del riego de los frutos rojos

La metodología descrita ha sido validada en el campo a través de una serie de ensayos llevados a cabo en fincas comerciales y en la Finca Experimental del IFAPA "El Cebollar" en Moguer. Este estudio exhaustivo se extendió a lo largo de 10 campañas de riego, abarcando desde 2011/12 hasta 2021/2022. Se monitorearon un total de 22 parcelas de riego, que incluyeron 168 macrotúneles en su conjunto. En cada una de estas parcelas se aplicaron dos tratamientos de riego, con tres o cuatro repeticiones cada uno, siguiendo un diseño de bloques al azar. En el primer tratamiento, se aplicó el riego de acuerdo con la metodología explicada anteriormente, mientras que en el segundo tratamiento se utilizó el método tradicional del agricultor, basado en su experiencia y prácticas habituales. Con el fin de facilitar la cosecha de cada tratamiento, la unidad experimental fue el invernadero completo, con un área aproximada de 450 m2. Para evaluar los diferentes tratamientos de riego, se instalaron lisímetros de drenaje en todas las parcelas, lo que permitió medir con precisión la eficiencia de la aplicación del riego. Además, se registró el agua aplicada utilizando caudalímetros instalados en cada uno de los tratamientos.

5.1. Riego aplicado y producción de los cultivos.

En la Tabla 7 se proporcionan los valores medios correspondientes a cada uno de los cultivos, incluyendo el riego aplicado (R), la evapotranspiración del cultivo (ETc), el rendimiento (Y), así como diversos indicadores que evalúan el comportamiento del riego. Entre estos indicadores se encuentran la eficiencia de aplicación del riego (Ea), la productividad del agua de riego (PAR) y la productividad económica del riego (PER). Ea se determinó como la relación entre el riego aplicado y la evapotranspiración del cultivo, lo que proporciona una medida del agua aplicada que es utilizada efectivamente por el cultivo. Por otro lado, la productividad del agua de riego se calculó como el cociente entre el rendimiento del cultivo y el riego aplicado, lo que indica la producción obtenida por unidad de agua aplicada. Asimismo, se evaluó la productividad económica del riego, que representa el rendimiento económico obtenido por unidad de agua aplicada.

El riego medio aplicado por los agricultores varió entre 4292 y 8752 m^3 ha^{-1}, mientras que las parcelas con riego programado aplicaron entre 3053 y 6177 m^3 ha^{-1}. Los valores más bajos se registraron en el cultivo de la frambuesa, mientras que los más altos correspondieron al arándano. El riego aplicado se incrementó con la duración del ciclo de cultivo, siendo menor para la frambuesa (6 meses de media) y mayor para el arándano (12 meses). El riego medio aplicado al cultivo de fresa varió entre 4740 y 8043 m^3 ha^{-1}. El mayor valor correspondió a las parcelas de los agricultores y el menor a las parcelas con riego programado. La fresa tiene un ciclo de cultivo intermedio, que varía entre 8 y 9 meses y, por tanto, un riego medio menor que el del arándano, pero mayor que el de la frambuesa. A pesar de las diferencias de riego aplicado entre las parcelas comerciales y las de riego programado, no hubo diferencias significativas entre las producciones de ambos tratamientos (Tabla 7), variando entre una media de 14,1 t ha^{-1} (frambuesa) y 69,7 t h^{-1} (fresa). Los ahorros medios de riego obtenidos usando la metodología descrita fueron del 29% para la frambuesa y el arándano y del 41% para la fresa. Estos ahorros de agua influyeron notablemente en los indicadores de comportamiento del riego.

La ETc media de las parcelas de los agricultores varió entre 2297 y 5120 m^3 ha^{-1} y entre 2531 y 5044 m^3 ha^{-1} en las parcelas con riego programado. Los menores valores correspondieron al

cultivo de la frambuesa y los mayores al del arándano. La fresa tuvo un valor intermedio de ETc (3097 y 3171 m^3 ha^{-1}para las parcelas programadas y las de los agricultores, respectivamente).

Tabla 7. Valores medios del riego aplicado (R), rendimiento (Y), evapotranspiración de cultivo (ETc), eficiencia de aplicación del riego (Ea), productividad del agua de riego (PAR) y productividad económica del riego (PER) en parcelas con riego programado y parcelas comerciales regadas por los agricultores en cultivos de frutos rojos de la provincia de Huelva (Gavilán *et al.*, 2024)

	R (m^3 ha^{-1})	Y (t ha^{-1})	ETc (m^3 ha^{-1})	Ea (%)	PAR (kg m^{-3})	PER (€/m^{-3})
	Parcelas de Riego Programado					
Frambuesa	3053	14,1	2531	84	5,6	32,1
Arándano	6177	30,6	5044	81	4,9	21,2
Fresa	4740	68,9	3171	67	14,8	19,9
	Parcelas Comerciales					
Frambuesa	4292	14,1	2297	59	4,1	23,7
Arándano	8752	31,1	5120	59	3,6	15,6
Fresa	8043	69,7	3097	41	9,5	12,8

5.2. Indicadores de comportamiento del riego

La eficiencia media de aplicación del riego (Ea) en las parcelas de los agricultores osciló entre el 41% para la fresa y el 59% para la frambuesa y el arándano, mientras que en las parcelas con riego programado fue de entre el 67% (fresa) y el 84% (frambuesa). Los valores medios de Ea para el arándano fueron del 81% y del 59% para las parcelas de riego programado y de los agricultores, respectivamente (Tabla 7). La menor eficiencia en las parcelas de los agricultores se debió al sobrerriego, que no se tradujo en un aumento de la ETc. Dado que el ciclo de cultivo del arándano es de 12 meses, fue el cultivo más demandante de agua, con una ETc media de 6800 m^3 ha^{-1} para plantaciones adultas. La mejora de Ea varió entre el 63% para la fresa y el 37% para el arándano, mientras que la eficiencia del riego de la frambuesa mejoró en un 42%.

La productividad del agua de riego en las parcelas de los agricultores osciló entre 3,6 y 9,5 kg m^{-3} para el arándano y la fresa, respectivamente. En las parcelas con riego programado, este indicador varió entre 4,9 (arándano) y 14,8 kg m^{-3} (fresa). Para la frambuesa, la productividad del agua de riego fue intermedia, con valores de 4,1 y 5,6 kg m^{-3} para las parcelas de los agricultores y de riego programado, respectivamente. La mejora de la productividad del agua de riego mediante la programación del riego varió entre el 36% (arándano y frambuesa) y el 56% para la fresa. Finalmente, la productividad económica del riego mostró un comportamiento similar, con mejoras del 35% para el arándano y la frambuesa, y del 48% para la fresa.

6. Conclusiones

En el riego de los frutos rojos cultivados en suelo en la provincia de Huelva, donde se aplican riegos de alta frecuencia, el balance de agua se simplifica al ignorar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. El objetivo es mantener el contenido de agua en el suelo

cercano a la capacidad de campo, por lo que la estrategia de programación consiste en reponer la evapotranspiración del cultivo (ETc) acumulada desde el último riego. Para calcular la ETc, se utiliza la metodología FAO, que emplea valores de evapotranspiración de referencia en invernadero (ETo inv) y coeficientes de cultivo (Kc) estimados o adaptados a las condiciones locales. Además, el uso del pronóstico meteorológico permite ajustar el riego según las condiciones climáticas previstas en los próximos días. Un modelo desarrollado en los invernaderos de Almería puede ser utilizado para estimar la ETo inv dentro de los macrotúneles. Por otra parte, los Kc basados en la cobertura del cultivo se consideran los más adecuados para la programación de riego. Para facilitar la aplicación de estas metodologías, se han desarrollado herramientas digitales como la aplicación Riego Berry. Esta aplicación proporciona recomendaciones de riego para los cultivos de fresa, frambuesa y arándano en la provincia de Huelva, basadas en datos locales y pronósticos meteorológicos. La aplicación de estas metodologías ha mostrado resultados prometedores en términos de ahorro de agua, eficiencia de aplicación del riego y productividad del agua de riego. Se han logrado ahorros medios de agua del 35%, incrementos medios de la eficiencia de aplicación del riego del 50% e incrementos de la productividad del agua de riego del 45%.

Bibliografía

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. FAO.

Allen, R.G.; Pereira, L.S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of groundcover and height. Irrigation Science, 28: 17–34.

Black, B.; Hill, R.; Cardon, G. (2008). Caneberry irrigation. In: Utah Berry Growers Association Newsletters. Utah State University Cooperative Extension.

Bonachela, S.; González, A.M.; Fernández, M.D. (2006). Irrigation scheduling of plastic greenhouse vegetable crops based on historical weather data. Irrigation Science, 25:53–62.

Cabelguenne, M.; Debaeke, Ph.; Puech, J.; Bose, N. (1997). Real time irrigation management using the EPIC-PHASE model and weather forecasts. Agricultural Water Management., 32: 227–238.

CAPADR (2023). Proyecto de canon de regulación y tarifa de utilización del agua en la demarcación hidrográfica Tinto-Odiel-Piedras. Consejería de Agricultura, Pesca, Agua y Desarrollo Rural. Junta de Andalucía.

CAGPDS (2020). Orden de 23 de noviembre de 2020, por la que se aprueba la modificación de las zonas vulnerables definidas en el Decreto 36/2008, de 5 de febrero, por el que se designan las zonas vulnerables y se establecen medidas contra la contaminación por nitratos de origen agrario. BOJA, diciembre de 2020.

CAGPDS (2021). Costes de producción. Campaña 2020/21. Observatorio de Precios y Mercados. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía.

CAGPDS (2022). Síntesis final de campaña. Frutos rojos. Campaña 2021/22. Observatorio de Precios y Mercados. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía.

Cai, J.; Liu, Y.; Lei, T.; Pereira, L.S. (2007). Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman–Monteith equation using daily weather forecast messages. Agricultural and Forest Meteorology, 145: 22–35.

De Pascale, S.; Dalla Costa, L.; Vallone, S.; Barbieri, G.; Maggio, A. (2011). Increasing Water Use Efficiency in Vegetable Crop Production: From Plant to Irrigation Systems Efficiency. Horttechnology, 21: 301–308.

Duce, P.; Snyder, R.L.; Soong, S.T.; Spano, D. (2000). Forecasting reference evapotranspiration. Acta Horticulturae, 537: 135-141.

Fereres, E.; Goldhamer, D.A.; Parsons, L.R. (2003). Irrigation water management of horticultural crops. HortScience, 38: 1036–1042.

Fernández, M.D. (2000). Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernadero y suelo enarenado en Almería. Tesis doctoral. Universidad de Almería (Spain).

Fernández, M.D.; Bonachela, S.; Orgaz, F.; Thompson R.; López, J.C.; Granados, M.R.; Gallardo, M.; Fereres, E. (2010). Measurement and estimation of plastic greenhouse reference evapotranspiration in a Mediterranean climate. Irrigation Science, 28: 497-509.

Gallardo, M.; Thompson, R. B.; Fernández, M.D. (2013). Water requirements and irrigation management in Mediterranean greenhouses: the case of the southeast coast of Spain. In: Good Agricultural Practices for greenhouse vegetable crops. Principles for Mediterranean climate areas. FAO, Rome.

Gavilán, P.; Ruiz, N. (2015). Optimización del riego en el cultivo de la fresa. La frecuencia del riego como determinante de la eficiencia del mismo y la producción. Vida Rural, julio 2015: 40-45.

Gavilán, P.; Ruiz, N.; Lozano, D. (2015). Daily forecasting of reference and strawberry crop evapotranspiration in greenhouses in a Mediterranean climate based on solar radiation estimates. Agricultural Water Management, 159: 307–317.

Gavilán, P.; Ruiz, N.; Lozano, D. (2019). Innovación y cambio tecnológico en los sistemas agrarios intensivos mediterráneos. En: El regadío en el Mediterráneo español. Una aproximación multidimensional, Alejandro Pérez-Pastor y Alberto Garrido (Coordinadores). Cajamar Caja Rural. pp: 181-206.

Gavilán, P.; Ruiz, N.; Lozano, D. (2021). Riego Berry. Una herramienta para la Programación del Riego de los Frutos Rojos. Guía de uso. Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera. CAGPDS. Junta de Andalucía.

Gavilán, P.; Ruiz, N.; Miranda, L.; Martínez-Ferri, E.; Contreras, J.I.; Baeza, R.; Lozano, D. (2021). Improvement of Strawberry Irrigation Sustainability in Southern Spain Using FAO Methodology. Water, 13: 833, 2-17.

Gavilán, P.; Higueras, J.L.; Lozano, D.; Ruiz, N. (2024). The Riego Berry mobile application: A powerful tool to improve on-farm irrigation performance in berry crops. Agricultural Water Management. 292, 1-14.

Gowing, J.W.; Ejieji, C.J. (2001). Real-time scheduling of supplemental irrigation for potatoes using a decision model and short-term weather forecasts. Agricultural Water Management, 47: 137–153.

Grattan, S.R., Bowers, W., Dong, A., Snyder, R.L., Carrol, J.J., George, W. (1998). New crop coefficients estimate water use of vegetables row crops. California Agriculture, 52: 16–21.

Hanson, B.R. (1996). Error in using historical reference crop evapotranspiration for irrigation scheduling. In: Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. November 1996. San Antonio, TX. Pp, 220-224.

Hanson, B.; Bendixen, W. (2004). Drip irrigation evaluated in Santa Maria Valley strawberries. California Agriculture, 58(1): 48-53.

Hanson, B. R.; Kaita, K. (1999). Historical reference crop ET reliable for irrigation scheduling during summer. California Agriculture, 53(4): 32-36.

Hill R.W.; Allen R.G. (1996). Simple irrigation scheduling calendars. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, ASCE 122(2): 107-111.

Holzapfel, E.; Jara, J.; Coronata, A.M. (2015). Number of drip laterals and irrigation frequency on yield and exportable fruit size of highbush blueberry grown in a sandy soil. Agricultural Water Management, 148: 207-212.

Lozano, D.; Ruiz, N.; Gavilán, P. (2016). Consumptive water use and irrigation performance of strawberries. Agricultural Water Management, 169, 44-51.

Lozano, D.; Miranda, L.; Martínez-Ferri, E.; Gómez-Mora, J.A.; Ariza, M.; Ruiz, N.; Gavilán, P. (2018). Necesidades de agua de la frambuesa de vara. Agricultura, octubre 2018: 64-70.

Lozano, D.; Ruiz, N.; Baeza, R.; Contreras, J.I.; Gavilán, P. (2020). Effect of Pulse Drip Irrigation Duration on Water Distribution Uniformity. Water, 12(8): 2276.

Luo, Y.; Changa, X.; Penga, S.; Khan, S.; Wang, W.; Zheng, Q.; Cai, X. (2014). Short-term forecasting of daily reference evapotranspiration using the Hargreaves–Samani model and temperature forecasts. Agricultural Water Management, 136: 42–51.

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (MAPA) (2023). Sistema de Información Agroclimática para el Regadío. Disponible online: https://servicio.mapa.gob.es/websiar/ (acceso el 13 de febrero de 2024).

Ortega, J.F.; de Juan, J.A.; Tarjuelo, J.M. (2005). Improving water management: The irrigation advisory service of Castilla-La Mancha (Spain). Agricultural Water Management, 77:37-58.

Ortega-Farias, S.; Espinoza-Meza, S.; López-Olivari, R.; Araya-Alman, M.; Carrasco-Benavides, M. (2021). Effects of different irrigation levels on plant water status, yield, fruit quality, and water productivity in a drip-irrigated blueberry orchard under Mediterranean conditions. Agricultural Water Management, 249. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106805.

Patrignani, A.; Ochsner, T.E. (2015). Canopeo: A powerful new tool for measuring fractional green canopy cover. Agronomy Journal, 107(6): 2312-2320.

Uribe, H. (2013). Riego en frambuesa. En P. Undurruga y S. Vargas. Manual de frambuesa. Boletín INIA Nº 264, 108 pp.

Van der Gulik, T.; Nyvall, J. (2001). Crop coefficients for use in irrigation scheduling. Water Conservation Factsheet. British Columbia. Ministry of Agriculture, Food and Fisheries.

Wilks, D.S.; Wolfe, D.W. (1998). Optimal use and economic value of weather forecasts for lettuce irrigation in a humid climate. Agricultural and Forest Meteorology, 89: 115–129

Distribuido por:
Comercial Química Massó, S.A.
Viladomat, 321 5° - 08029 Barcelona (España) Tel: +34 93 495 25 00Fax: +34 93 495 25 02
masso@cqmasso.com - www.massoagro.com

John Deere 300M: el primer pulverizador autopropulsado para cultivos de alto valor

El líder mundial de maquinaria, soluciones y tecnología para los profesionales del campo, JOHN DEERE, ha lanzado el **300M**, un nuevo **pulverizador autopropulasdo** del segmento de compactos con altas prestaciones para los **cultivos de alto valor** y las zonas estrechas.

Se trata de un innovador modelo, **inteligente y compacto**, que cuenta con cabina frontal e incorpora la última tecnología de John Deere de **agricultura de precisión.** Adicionalmente, el 300M tiene un radio de giro mínimo y dos tipos de barras con o sin manga neumática.

Perfecto para la agricultura de precisión

El pulverizador 300M está equipado con las últimas funciones esenciales de agricultura de precisión John Deere. Incluye el **receptor StarFire™, JDLink™ y pantalla universal G5Plus**.

Además, el diseño del **sistema de líquidos de dos circuitos PowrSpray™** también es otra de las características clave del 300M. Realiza un llenado rápido de hasta 600 l/min con una salida muy precisa de 750 l/min a tres bares. La tecnología PowrSpray™, que ya se emplea en el modelo remolcado R700i, ofrece varias ventajas, como el **llenado sencillo** gracias a **Active Pause** y el **eyector de 50L PowrFill.**

El control directo de dosis del PowrSpray™ **elimina el exceso o escasez de dosificación** y, en aplicaciones de dosis variable, el ajuste es prácticamente instantáneo. De la mano de TerrainCommandPro y el control de boquillas individual, la precisión general es impecable.

El diseño único de la **bomba de pulverización centrífuga** con control de dosis le permite un tiempo de respuesta rápido de tres segundos de mínimo a máximo y **precisión del 98%.**

Asimismo, la **cabina CAT 4** está equipada con la última tecnología en filtros y su disposición está diseñada para ofrecer al agricultor una **excelente visibilidad completa de la barra.** En cuanto a comodidad, los asitentos tienen suspensión y calefacción.

Disponibles dos modelos: 332M y 340M

El **332M** cuenta con un tamaño de depósito de 3.200L y un motor de 175 CV y 4 cilindros John Deere. Además, incorpora una barra de pulverización con hasta 28m y radio de giro de 3,8m. Estas características lo convierten en un modelo **ideal para trabajar en zonas estrechas.**

Por su parte, el **340M** dispone de un tamaño de depósito de 4.000L y un motor de 225 CV y 6 cilindros John Deere. Una potencia que, sumados a un ancho de trabajo de hasta 36m y un radio de giro de 4,2m, facilitan el **alto rendimiento y funcionamiento compacto** al mismo tiempo.

Con su diseño compacto y dirección en las 4 ruedas, tanto el modelo 332M como el 340M **resultan ideales para carreteras estrechas** y trabajo de campo en cualquier situación. Su **ancho de vía ajustable automáticamente**, desde 150-180cm, 180-225cm y 225-300cm, permite un

uso flexible en todos los tipos de cultivos, incluidos los **cultivos de alto valor**, entre otros: olivar, viña, almendro, manzano y pistacho, que tienen gran protagonismo en el campo español. La **distribución del peso 50:50** reduce la compactación del suelo y hace que las labores sean posibles incluso en condiciones difíciles.

Ambos se fabrican con una barra construida en acero y otra de acero inoxidable con **una manga neumática,** y están disponibles con el control individual de boquillas. En cultivos de alto valor, la manga neumática ofrece una **excelente cobertura de los cultivos altos y frondosos** incrementando la penetración del dosel del cultivo. En este sentido, la cortina neumática mueve el cultivo y favorece la correcta penetración de la pulverización en la vegetación. Un aspecto que lo hace **ideal para lechugas, hortalizas y fresa.**

Contacto

JOHN DEERE IBÉRICA S.A.
Bulevar John Deere, 2.
28984 Parla (Madrid) - ESPAÑA
Tel.: +34- 916 009 500
jdiberica@johndeere.com
https://www.deere.es/es/

4.3. Tecnología de aplicación de fitosanitarios y ahorro de agua

Emilio Gil

[1] *Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología, Universitat Politècnica de Catalunya*

* emilio.gil@upc.edu

Índice

1. Introducción 368
   1.1. Cultivos extensivos 368
   1.2. Cultivos arbóreos o cultivos especiales 369
2. Caracterización del objetivo y tecnologías disponibles 373
3. Nuevas tecnologías en tratamientos fitosanitarios 375
4. Herramientas para la determinación del volumen óptimo 375
5. Dispositivos electrónicos para la caracterización de la vegetación 376
   5.1. Sensores embarcados: tecnología disponible 376
   5.2. Sensores remotos: drones y satélites 377
6. Aplicación selectiva en bandas con sensores de vegetación 378
7. Equipos para aplicación variable en cultivos frutales 380
8. Reducción de pérdidas y ahorro de agua 383
9. Formación y digitalización: como mejorar la adopción de las nuevas tecnologías 385

Resumen

Hablando de recursos, ¿Cuáles son los recursos que utilizamos en un tratamiento fitosanitario? Mayoritariamente son el producto fitosanitario, agua y gasoil. Hay otro del que no vamos a hablar en esta ocasión pero que está al mismo nivel de importancia que los demás: el tiempo. Sin entrar en el aspecto crucial de la dosificación del producto fitosanitario, para lo que hay que seguir las indicaciones de las etiquetas de los productos, si podemos hablar de la cantidad de volumen a aplicar. Y ahí el agua juega un papel fundamental. Las actuales técnicas de aplicación, las llamadas herramientas de la agricultura de precisión y, sobre todo, la adopción de las Buenas Prácticas Agrícolas y el sentido común, sí que demuestran claramente que se puede ahorrar agua racionalizando el proceso. Las líneas siguientes presentan diferentes ejemplos y casos contrastados en los que la combinación de los anteriores factores permite una protección de cultivos eficaz, sostenible, medioambientalmente segura y, además, con importantes ahorros de agua.

1. Introducción

El párrafo inicial de este capítulo abre la puerta a una discusión interesante. Si bien es cierto que el único responsable del control de la plaga o la enfermedad es el producto fitosanitario, no es es menos cierto que un adecuado ajuste del volumen de caldo incide de forma directa en la eficiencia y eficacia del proceso. De ahí la pregunta: ¿es importante ajustar el volumen de aplicación o, lo que es lo mismo, la cantidad de agua? ¿cuáles son los factores que influye en esta decisión? Para avanzar en esta discusión primero debemos realizar una clara diferenciación entre lo que se conoce como cultivos extensivos -*Field Crops* en la terminología inglesa- o los cultivos tridimensionales o los cultivos arbóreos o arbustivos, los recientemente denominados cultivos especiales o "*Specialty Crops*". Las diferencias en cuanto a los criterios para la determinación del volumen adecuado en ambos casos son abismales, de ahí que merezcan un tratamiento individual.

1.1. Cultivos extensivos

En una primera aproximación podemos suponer que el cultivo es capaz de colonizar toda la superficie de terreno por lo que una hectárea de suelo implica una hectárea de cultivo a mojar. Esta sería una primera aproximación bastante acertada para el caso de cultivos extensivos como los cereales o los cultivos forrajeros. En estos casos la selección y adecuación del volumen de agua a aplicar dependerá fundamentalmente del estadio vegetativo del cultivo y de su grado de crecimiento, cumpliéndose en general la premisa de que, a mayor densidad mayor cantidad de agua será necesaria para garantizar un adecuado recubrimiento de la superficie a tratar.

Figura 1. Diferentes estadios de desarrollo de un cultivo de lechuga y grado de recubrimiento del terreno

Mención especial merece el caso de los cultivos en bandas. Siendo también parte del grupo de los *field crops*, los cultivos en bandas, fundamentalmente los cultivos hortícolas, se caracterizan por una colonización del terreno que no es total, o al menos no lo es durante todo el periodo. A lo largo de todo el ciclo de cultivo se pueden observar, en mayor o menor medida, zonas de terreno descubiertas. En este caso, ¿tiene sentido hablar de volumen por hectárea de terreno? ¿o es más adecuado hablar de volumen de agua por superficie colonizada por el cultivo? La Figura 1 muestra diferentes estados de desarrollo de un cultivo de lechuga y los índices aproximados de grado de recubrimiento del terreno. Es evidente que, en este caso, una adecuación de la tecnología o un proceso racional de calibración y ajuste del equipo a las características específicas del objetivo a tratar, resultaran en ahorros importantes de agua. La Figura 2 muestra una de las múltiples herramientas disponibles on-line para la calibración de un equipo para tratamientos en bandas.

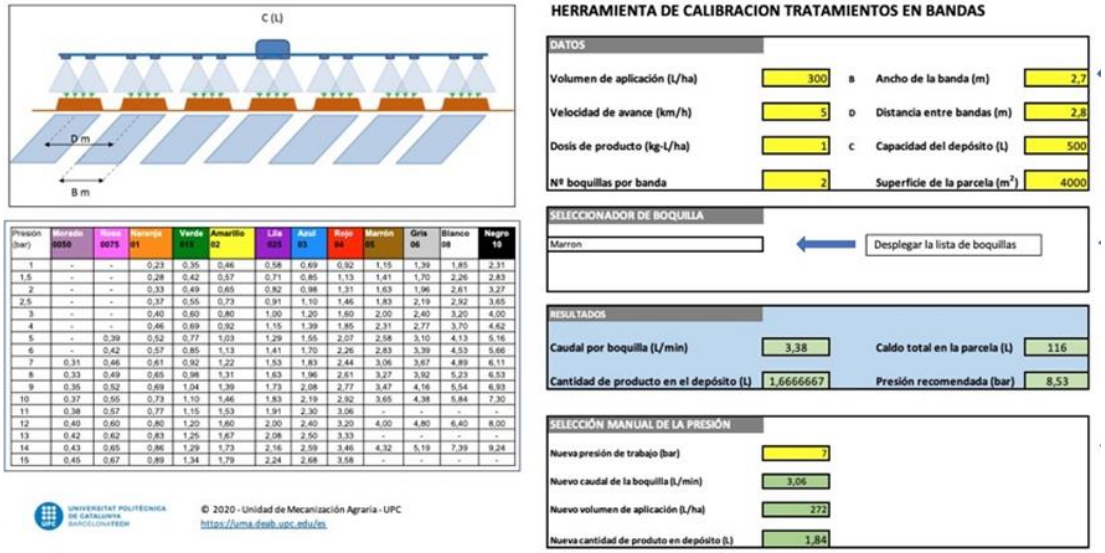


Figura 2. Herramienta para la calibración de equipos para tratamientos en bandas. Fuente www.uma.deab.upc.edu

1.2. Cultivos arbóreos o cultivos especiales

Sin duda se trata del caso más complejo a la hora de garantizar eficiencia en los tratamientos, y un caso en el que pequeñas modificaciones y ajustes pueden derivar en importantes beneficios. Y ello es debido a dos condicionantes fundamentales. En primer lugar, por la dificultad intrínseca que conlleva conseguir un tratamiento adecuado a una masa vegetal normalmente heterogénea y de difícil acceso. Por otra parte, por la gran cantidad de tratamientos fitosanitarios que se realizan en este tipo de cultivos, en comparación con los realizados en los llamados cultivos bajos. La combinación de esos dos factores, unida al hecho de una clara necesidad de establecer criterios adecuados para la determinación del volumen óptimo recomendado, hacen que este tipo de cultivos sea el que requiere una mayor atención. Cabría añadir un tercer condicionante: durante el proceso es necesario el ajuste y control de dos fluidos que actúan de forma combinada, el líquido a distribuir y el aire encargado de su transporte. Y en ambos casos su distribución debe ajustarse en la medida de lo posible a las características estructurales de la vegetación.

Según EUROSTAT, España, Francia e Italia registran alrededor del 50% de la cantidad total de fungicidas en Europa, siendo los tres países los principales productores de uva y frutas. En

Francia, uno de los mayores productores europeos de vino, el sector vitivinícola utiliza más del 20% de la cantidad total de productos fitosanitarios, en una superficie agrícola reducida, inferior al 3% de la superficie productiva total. Esta tendencia también se ha detectado en otros países como España, Italia, Portugal y Grecia, donde la uva y la fruta representan la mayor parte de la producción. En Francia se ha organizado una importante acción centrada en el viñedo mediante la puesta en marcha de la red DEPHY, en la que participan más de 250 organizaciones de agricultores y más de 2.800 agricultores, con el objetivo común de probar y evaluar las técnicas y los sistemas desarrollados para reducir el uso de productos fitosanitarios. El grupo DEPHY ya ha demostrado reducciones de hasta un 33% en el caso de la viña. En cuanto a los frutales, investigaciones recientes han demostrado que la cantidad de productos fitosanitarios puede reducirse hasta un 43% aplicando las mejores prácticas de gestión y teniendo en cuenta la estructura de la cubierta vegetal como base para una correcta dosificación de los productos fitosanitarios. Y todo ello, por supuesto, se hace extensible a un potencial ahorro de agua, resultando pues evidente que cualquier mejora en las técnicas de aplicación de productos fitosanitarios en cultivos arbóreos redundará, sin duda, en importantes ahorros de agua.

Pero ¿cuál es el volumen óptimo de aplicación? Y, sobre todo, ¿cómo se debe expresar la dosis de producto fitosanitario? Son dos preguntas de difícil respuesta, aunque bien es cierto que en estos últimos tiempos se han producido avances encaminados a dar respuesta a ambas preguntas. Respecto a la primera, parece lógico pensar que el volumen de aplicación, cuando hablamos de tratamientos en viña -y lo mismo puede aplicarse al caso de los frutales- debe pasar por tener en cuenta las características del objeto que se desea “mojar”.

La determinación de la dosis óptima de producto fitosanitario y a la forma de expresarla es un tema controvertido del que, evidentemente, no daremos aquí la solución mágica. Si que veremos algunas tendencias y algunas experiencias que llevan a cierta tendencia de expresar la dosis de producto basada en las características de vegetación. En todo caso, debe tratarse a dosis ajustadas a las necesidades estrictas del tratamiento, dándose por supuesto el empleo de las mejores técnicas disponibles que permitan alcanzar el nivel de control -eficacia- esperado. Actualmente, en tratamientos de cultivos arbóreos (cultivos 3D), la dosis expresada simplemente en concentración (%) o por superficie tratada (Ha) se considera que no se ajusta a estos principios. Es necesario, por tanto, avanzar en la adopción de una forma común para la expresión de dosis que tenga en consideración las características del cultivo y sea fácilmente aplicable a escala productiva. Lograr una aplicación racional de los productos fitosanitarios, una reducción de la cantidad de producto empleado, un importante ahorro económico y una notable disminución del riesgo de contaminación medioambiental se presentan como los restos más importantes.

Existe desde hace tiempo una discusión sobre los modelos de ajuste de la dosis de producto fitosanitario y el volumen de caldo adaptados a las características de la vegetación (Figura 3). Los más significativos en el caso de la viña son el conocido como **Leaf Wall Area** (LWA), basado en la anchura de la calle y la altura de la vegetación y el **Tree Row Volume** (TRV) basado en la anchura de calle, la altura y anchura de la vegetación. En el primero de los casos el concepto es simple y lógico: se trata de ajustar la dosis de producto y de volumen de agua a la superficie de pared vegetativa que hay en una hectárea de terreno (L/ha de pared vegetal). Pura lógica. El segundo, el TRV, presenta ya un grado de complicación superior, al considerar el volumen de

vegetación por hectárea el parámetro de referencia (L/m^3 de vegetación. Y para la determinación de ese volumen es preciso determinar el ancho medio de la vegetación y la densidad del mismo, algo nada sencillo en algunos casos. Recientemente la EPPO ha decidido adoptar el sistema LWA (superficie de pared vegetal) como referencia para expresar la dosis en viñedo en espaldera. El sistema ya está siendo utilizado en los ensayos de eficacia previos al registro; sin embargo, en la práctica productiva, plantea interrogantes que deberán resolverse. Evidentemente, en el Registro Oficial de Productos Fitosanitarios, aún se mantienen productos registrados con las formas de expresión tradicionales.

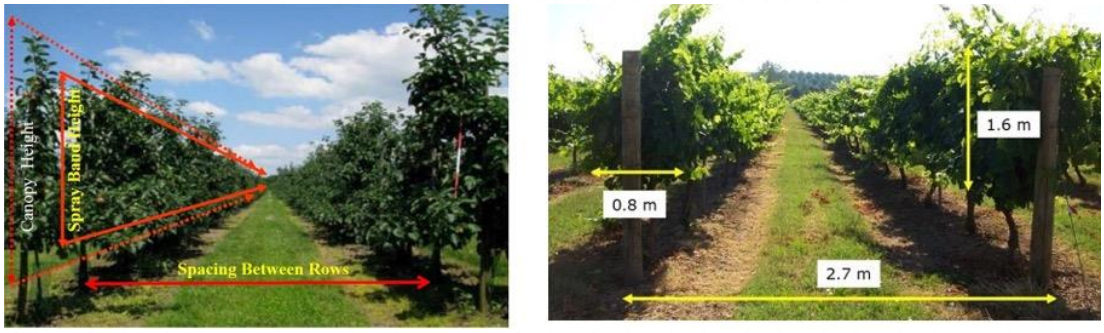


Figura 3. Métodos para la determinación del LWA (izquierda) y el TRV (derecha)

Por tanto, las características estructurales y/o geométricas de la vegetación tienen su importancia. Dicho de otro modo, en una hectárea de terreno (10000 m^2) la cantidad de vegetación es muy diferente en una misma parcela dependiendo del estadio vegetativo, de la variedad, del marco de plantación por lo que hablar en términos de volumen por hectárea resulta algo ambiguo. Bien es cierto que se deben establecer sistemas de fácil aplicación, y que para caracterizar la vegetación se deben establecer medidas simples y rápidas en campo que le permitan al agricultor su aplicación inmediata (Figura 4). Cualquier otra alternativa supondrá el abandono definitivo de la propuesta. De ahí la importancia de la tecnología.

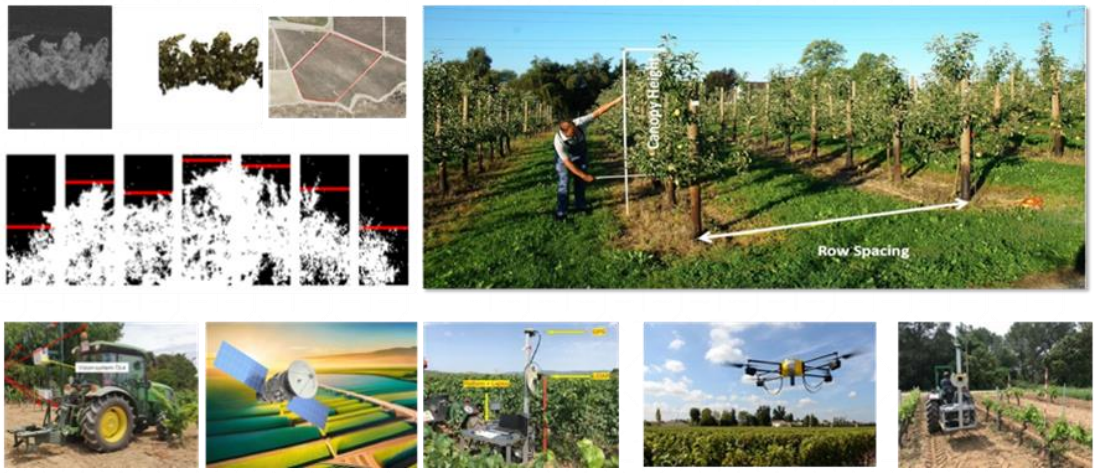


Figura 4. Diferentes modos para caracterizar la vegetación en cultivos arbóreos

Resulta evidente, por tanto, que la determinación del volumen óptimo de agua y la cantidad adecuada de producto fitosanitario son aspectos ambos que están directamente relacionados con las características estructurales de la vegetación (Figura 5). En cualquier caso, una caracterización precisa y objetiva de la estructura de la vegetación es un aspecto que está íntimamente relacionado con el concepto de aplicación variable (VRA- *Variable Rate Application*). Asumiendo que el objetivo es mantener una tasa de aplicación constante por

unidad de masa/volumen/área objetivo, estos desarrollos en la medición y caracterización de la vegetación se han relacionado con investigaciones centradas en la definición y diseño de equipos capaces de modificar los parámetros de pulverización (presión de trabajo, caudal y número de boquillas, etc.) en continuo, adecuándose a los cambios observados en la vegetación teniendo siempre como objetivo el mantenimiento de una tasa de aplicación constante por unidad de superficie/volumen a tratar.

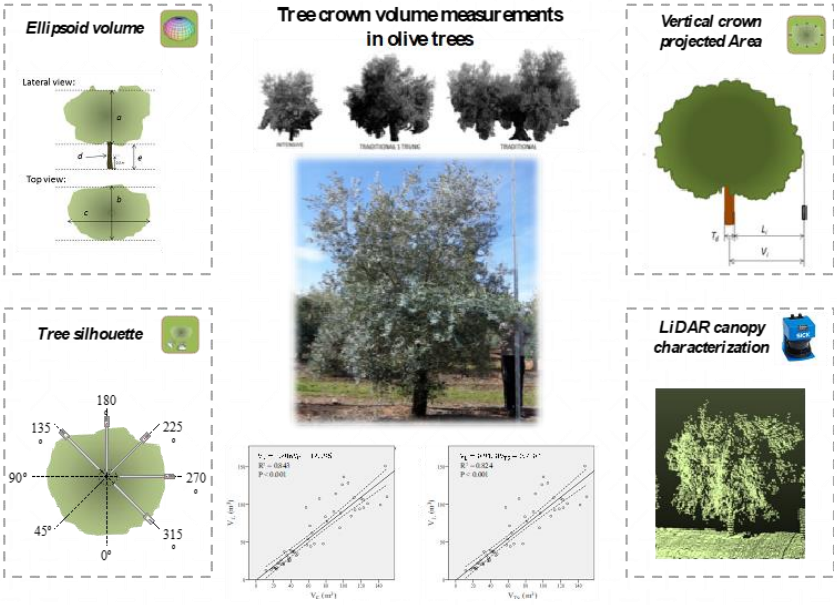


Figura 5. Existen diversas herramientas desarrolladas para una eficaz caracterización de la vegetación en cultivos "difíciles" como el caso del olivo

Paradójicamente, los requerimientos establecidos por EPPO para la implementación del método LWA como modelo para la expresión de dosis en cultivos 3D uniformes (viñedos, plantaciones de frutales en forma de seto…) es solo obligatorio en la zona Central de Europa. En la zona Sur, donde la concentración de producto es la forma más empleada de expresión de dosis, este sistema todavía no se ha aceptado. Sorprendente siendo esta zona Sur la más importante en cuanto a producción de este tipo de cultivos (Figura 6).

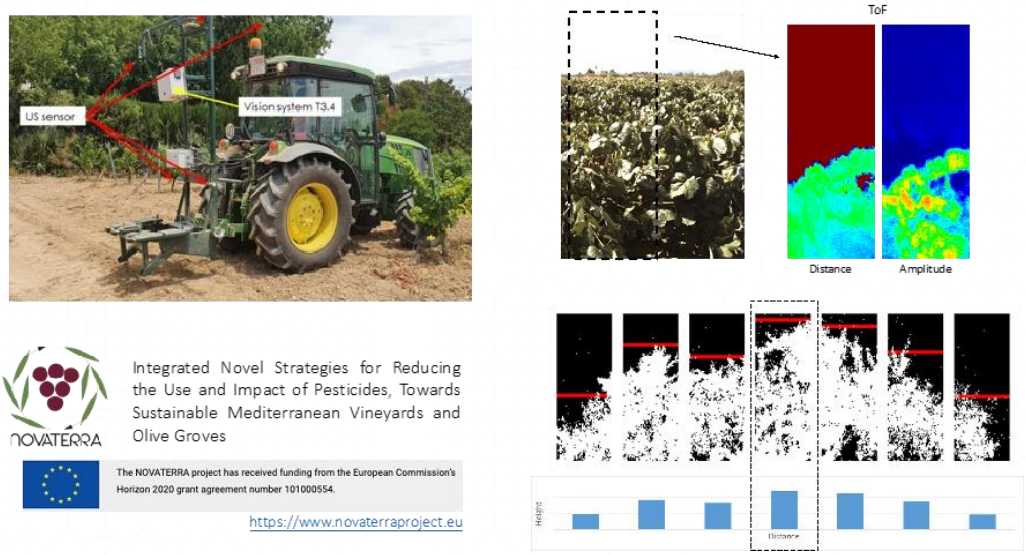


Figura 6. Proyectos de investigación como NOVATERRA (www.novaterraproject.eu) han conseguido importantes avances en aspectos como la caracterización electrónica de la vegetación en viñedo y olivar

2. Caracterización del objetivo y tecnologías disponibles

Antes de realizar un repaso a las tecnologías disponibles y a los nuevos desarrollos cuyo objetivo es el de adecuar la dosis y el volumen óptimo de aplicación en función de la vegetación, es necesario clarificar algunos conceptos. Estos conceptos han sido recientemente definidos en el seno de **EUPAF – European Precision Application Task Force** (Figura 7) y permiten clasificar de forma adecuada las diferentes técnicas de aplicación en función del objetivo a tratar.

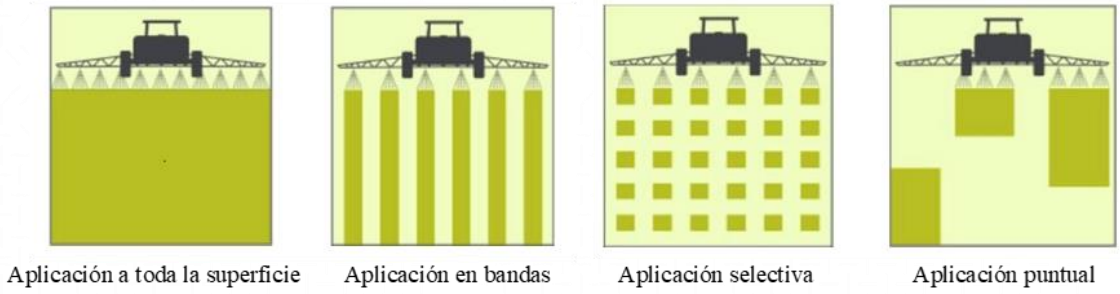


Figura 7. Diferentes conceptos de aplicación de productos fitosanitarios en cultivos bajos. Fuente EUPAF

- **Aplicación a toda la superficie:** se refiere principalmente a la técnica de aplicación autorizada existente de aplicar a toda la superficie de terreno, utilizando las tecnologías de boquillas y barras existentes para aplicar la misma dosis autorizada y el mismo volumen de agua a todo el campo y para todos los tipos de pulverizadores. En este caso existen en el mercado numerosas soluciones que permiten mejorar el proceso lo que ayuda a conseguir reducciones del uso de agua y producto fitosanitario. Las técnicas de aplicación variable (VRA) permiten reducciones de uso del 20-40% en algunos casos; incluso una calibración precisa de estos pulverizadores ajustándose a las características de la vegetación puede reducir el uso en un 10-25%, dependiendo del cultivo y de la situación.
- **Aplicación en bandas:** La cantidad de productos fitosanitarios y el volumen de agua que deben aplicarse y dónde deben aplicarse se conocen de antemano, ya que las bandas tienen una posición (y una anchura) fijas. Las bandas suelen estar fijas en relación con la hilera de cultivo y todos los equipos para el tratamiento en bandas parecen utilizar boquillas de geometría fija. Sin embargo, la aplicación en bandas debe diferenciarse entre aplicación sobre el cultivos y aplicación a la zona no colonizada por el cultivo, y debe debatirse y acordarse la precisión de la aplicación requerida para cada tipo de aplicación de bandas. En la actualidad, la pulverización en bandas se realiza frecuentemente con tecnologías de reducción de la deriva, principalmente boquillas de ángulo estrecho, pulverizaciones gruesas y bajas alturas de pulverización en cultivos de campo, y boquillas de distribución uniforme que no requieren solape.
- **Aplicación selectiva (parches):** la aplicación selectiva (o en parches) es una modalidad tecnológica que permite reducir la cantidad de producto fitosanitario y de agua aplicada, ya que sólo se pulveriza allí donde se encuentran las malas hierbas o el cultivo (en su caso). El sistema de aplicación selectiva se basa, bien en la elaboración previa y lectura georreferenciada de un mapa de prescripción, o bien en el empleo de sofisticados sensores y dispositivos de accionamiento automático instalados en el equipo, que permiten la detección de la mala hierba y la aplicación selectiva en la zona detectada.

La utilización de estos sistemas de aplicación selectiva puede suponer ahorros de producto fitosanitario y de cantidad de agua que alcanzan en algunos caos el 75-80%.

- **Aplicación puntual (*Spot Application*):** se trata de una sofisticada técnica de aplicación que, como su nombre indica, realiza una aplicación puntual de producto fitosanitario (y de agua) justo en el lugar necesario. Los principales trabajos de investigación/ensayos publicados que confirman las importantes reducciones potenciales del uso de herbicidas y volumen de agua utilizando técnicas más recientes de aplicación puntual se sitúan en el periodo posterior al año 2000. En la década de 2000 se llevaron a cabo con éxito ensayos y la introducción comercial de la pulverización puntual de herbicidas pre-emergentes en cultivos extensivos utilizando sensores que podían detectar materia vegetal verde en la superficie del suelo (de ahí que se denomine aplicación «verde sobre marrón»), sobre todo en Australia, con el control de boquillas individuales utilizado para pulverizar plantas de malas hierbas de forma individual. Esto demostró un potencial de reducción de producto fitosanitario y de agua incluso mayor que la pulverización en parches (más del 90% de reducción del uso). Esto ha estimulado una considerable investigación adicional en la última década, tanto en Europa como en los EEUU, sobre aplicaciones puntuales post-emergentes en cultivos de campo, de nuevo principalmente de herbicidas, que también muestran un potencial muy significativo para la reducción del uso, pero requieren diferentes técnicas de detección. Es evidente que estas técnicas revolucionarias no están todavía al alcance de todos los agricultores.

Todas estas definiciones anteriores, bastante claras cuando se aplican a cultivos bajos, se complican enormemente cuando hablamos de cultivos arbóreos. La figura 8 muestra un resumen de las diferentes posibilidades on las que podemos encontrarnos cuando combinamos tecnologías con distintas modalidades de distribución para el caso de los atomizadores.

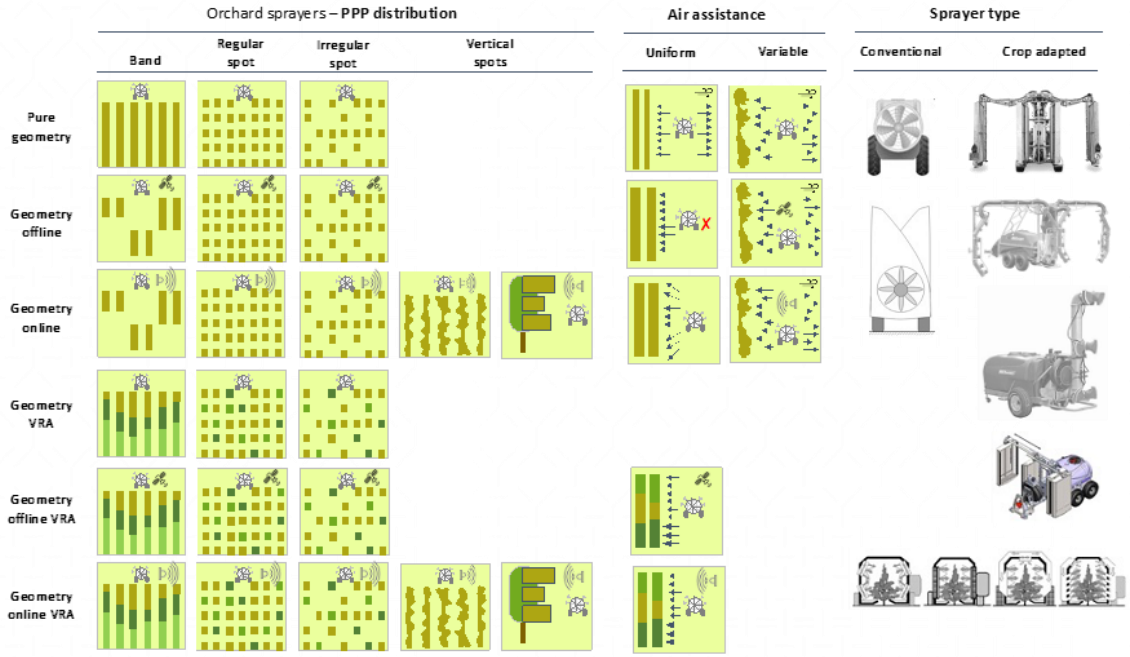


Figura 8. Variabilidad de posibles situaciones y equipos para tratamientos en cultivos arbóreos. Fuente: EUPAF

3. Nuevas tecnologías en tratamientos fitosanitarios

Es evidente que es absolutamente necesaria una adecuación de la cantidad de aplicación de producto fitosanitario y agua, y que, al mismo tiempo, es preciso georreferenciar la ubicación exacta del objetivo a mojar. La combinación de ambos aspectos – no siempre fácil – resultará en equipos capaces de realizar una aplicación de calidad, selectiva, con volúmenes reducidos y con eficiencias ye eficacias muy superiores a las actuales. Muchas de estas tecnologías están ya disponibles en el mercado si bien su grado de adopción es, por diferentes motivos, reducido o muy reducido en algunos casos. No obstante se recogen en las líneas siguientes algunos ejemplos de equipos ya disponibles y de recientes desarrollos fruto de proyectos de investigación, que ponen de manifiesto que es posible una racionalización de las aplicaciones de productos fitosanitarios que van a permitir cumplir con la recientemente establecida normativa europea (El Pacto Verde Europeo), posibilitando una importante reducción del uso de productos fitosanitarios, y una nada despreciable reducción de la cantidad de agua empleada en esta actividad estratégica. Un pequeño ejercicio de escala suponiendo posibles reducciones en la cantidad de agua empleada en una parcela determinada de un 50%, multiplicada por el número de aplicaciones por campaña, y por la superficie total ocupada por todos los cultivos, nos llevará sin duda a cifras astronómicas de ahorro potencial de agua.

4. Herramientas para la determinación del volumen óptimo

Si bien es simple decir que el volumen de caldo debe ajustarse a la estructura de la vegetación, especialmente en el caso de los cultivos tridimensionales, el proceso no resulta tan simple cuando debe ser implementado en la parcela. Por eso diversos investigadores han desarrollado herramientas que permiten, de una manera fácil y muy intuitiva, realizar los pasos adecuados para calcular un volumen de aplicación que se adapte a las características estructurales y ambientales de la vegetación. Ejemplos como DOSAVIÑA (https://dosavina.upc.edu), CITRUSVOL (https://citrusvol.com/citrusvol/), DOSAOLIVAR (https://dosaolivar.es), o la plataforma Sprayers101 (https://sprayers101.com), son ejemplos de herramientas ya disponibles que han demostrado su interés y su funcionalidad (Figura 9).

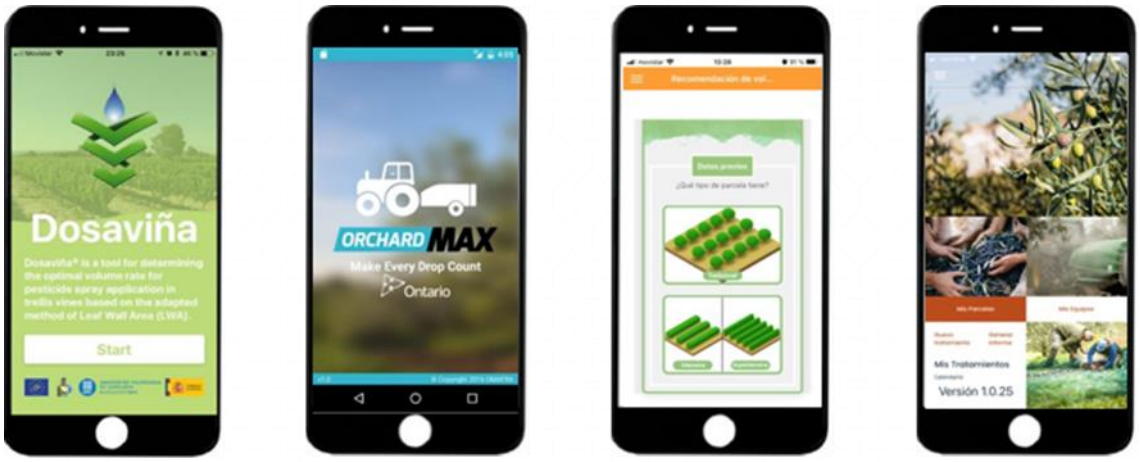


Figura 9. Algunas herramientas disponibles para el cálculo del volumen de aplicación optimo en tratamientos fitosanitarios en cultivos arbóreos.

5. Dispositivos electrónicos para la caracterización de la vegetación

La información detallada sobre las características de la vegetación es una necesidad para un manejo adecuado de los cultivos, no solo con respecto a la aplicación de fitosanitarios, sino también para el manejo de insumos tan importantes como el agua o los fertilizantes, y para la gestión de los procesos de poda y cosecha, todos ellos aspectos importantes para lograr el objetivo principal de un alto rendimiento y una producción segura. Las características geométricas de la copa de los árboles están directamente relacionadas con el crecimiento y la productividad de los árboles, y esta información ha sido utilizada por diferentes autores para predecir el rendimiento, la aplicación de fertilizantes en cultivos de cítricos, el consumo de agua o la biomasa.

La estructura y dimensiones de cultivos como la viña o los frutales de hoja caduca (manzanos, melocotoneros, perales…) varía enormemente según la etapa vegetativa, el sistema de formación, la variedad y la densidad de plantas, y todos esos cambios afectan a la relación entre la cantidad de producto aplicado y el depósito obtenido en el cultivo objetivo. Las aplicaciones de fitosanitarios sin ninguna consideración de la estructura del cultivo están en contradicción con el principio general de que la aplicación foliar debería generar depósitos similares, independientemente del tamaño del cultivo o la densidad del mismo. Este objetivo conducirá a un aumento considerable de la eficacia y la eficiencia durante el proceso, reduciendo la cantidad total de productos fitosanitarios requeridos, de acuerdo con las tendencias recientes de la UE y evitando los problemas más graves relacionados con la contaminación ambiental.

Se puede hablar de dos tipos de sensores los que actualmente se emplean para la caracterización de la vegetación: sensores embarcados y sensores remotos. Independientemente de la tecnología empleada en cada uno de los sistemas, estos dos grupos de sensores se asocias a lo que recientemente se ha denominado como Aplicación Variable on-line (VRA – on line) o Aplicación Variable off-line (VRA – off line) (Figura 10).

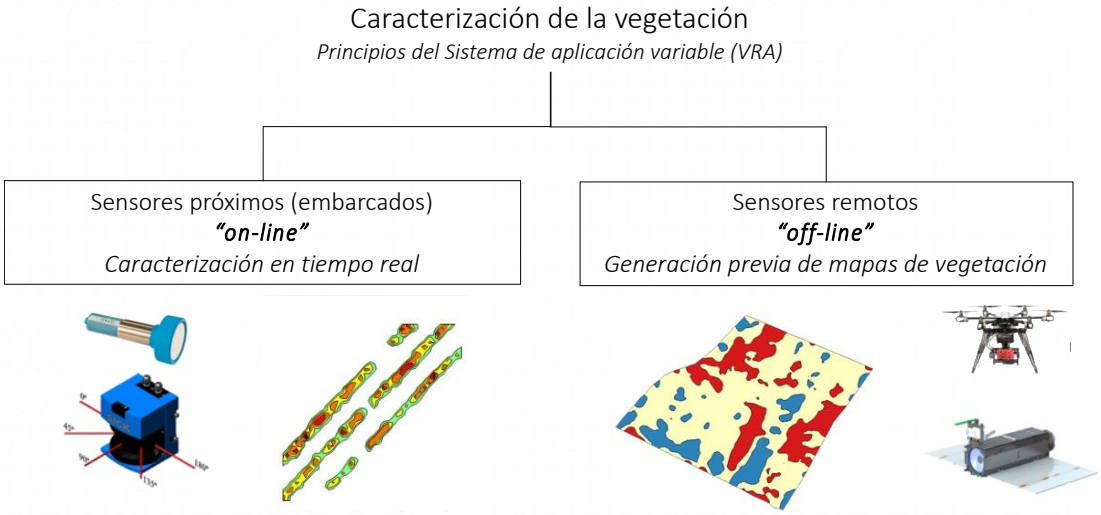


Figura 10. Alternativas a la denominada Aplicación de Tasa Variable (VRA)

5.1. Sensores embarcados: tecnología disponible

Dentro del primer grupo, los llamados sensores embarcados, podemos hablar de sensores de ultrasonidos, sensores con tecnología LIDAR y sensores espectrales (cámaras de visión).

Numerosos son los resultados obtenidos por muchos grupos de investigación en todo el mundo sobre la bondad y el interés del uso de este tipo de sensores para la caracterización de la vegetación. Tras todos esos resultados, algunas recomendaciones pueden establecerse:

- El uso de sensores ultrasónicos permite obtener información interesante sobre el ancho del cultivo y su variabilidad a lo largo de la hilera, pero aparecen limitaciones debido al rango de actuación del sensor y al aumento de la amplitud de onda dependiendo de la posición. Las mediciones de ancho de cultivo puntual deben extrapolarse a un área de vegetación definida, con cierto riesgo de errores.
- A pesar de las dificultades mencionadas anteriormente, se puede predecir, con buena precisión, información interesante como el volumen de vegetación o incluso el índice del área foliar.
- La caracterización de la vegetación con sensores LIDAR parece un método muy preciso. Se puede obtener información valiosa, como el porcentaje de huecos en la pared del cultivo, la variabilidad de la altura a lo largo de la hilera o incluso el área de la pared de la hoja con buena precisión. Pero la parte más difícil del sensor LIDAR ocurre durante el análisis de datos posterior al procesamiento. Se debe desarrollar un software específico para obtener información precisa.
- Los datos obtenidos con sensores ultrasónicos son en general menos precisos que los obtenidos con LIDAR, pero este hecho se puede compensar con su facilidad de uso, especialmente cuando se compara con el sensor LIDAR.

En general, el uso en campo de sensores ultrasónicos y láser, junto con un software adecuado, parecen herramientas interesantes para mejorar el proceso de aplicación de productos fitosanitarios, al usar toda la información detallada de la estructura de la vegetación en la definición de las dosis óptimas de producto y en el volumen de caldo a distribuir.

5.2. Sensores remotos: drones y satélites

Se incluyen fundamentalmente en este grupo los sensores instalados en los equipos aéreos no tripulados (drones) y los satélites. En el primer caso, la instalación de cámaras de diversas características en un dron permite una caracterización precisa de la vegetación, eso sí, tras un complejo proceso de análisis de imágenes y tratamiento de datos. Las ventajas potenciales del dron para la caracterización de la vegetación están vinculadas a su capacidad de caracterización de grandes áreas, coste relativamente bajo de funcionamiento, gran capacidad para registrar grandes volúmenes de datos y potencial para obtener una imagen real desde arriba, brindando información complementaria sobre el cultivo distribución sobre el área medida. La teledetección, y más específicamente el índice NDVI, ha sido ampliamente estudiada y correlacionada con ciertas características estructurales y fisiológicas de las vides. Por ejemplo, se han encontrado muy buenas correlaciones entre este índice y el área foliar en parcelas de viñedos.

Los satélites son otro de los sensores remotos que están adquiriendo importancia estos últimos años. El empleo de imágenes generadas por las diferentes constelaciones de satélites puede servir como herramienta adecuada para una caracterización de la vegetación fiable. Obviamente la precisión de esta información no alcanza los valores que presenta la imagen del dron, pero como contrapartida permite un manejo de información mucho más rápido y una obtención de imágenes de forma inmediata y a un precio mucho más reducido. Diversos estudios han

demostrado el interés que este tipo de caracterización de la vegetación tiene, con resultados muy interesantes (Figura 11).

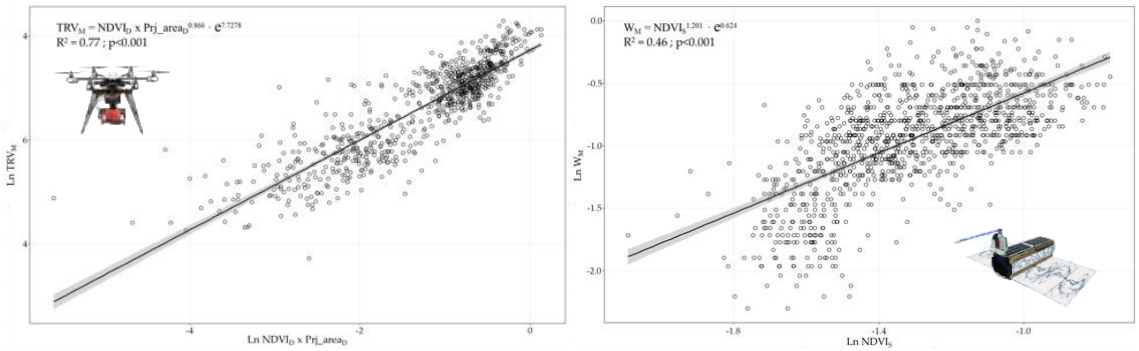


Figura 11. Sensores remotos (dron y satélite) para la caracterización de la vegetación en viña (Fuente: Campos *et al.*, 2021)

6. Aplicación selectiva en bandas con sensores de vegetación

La aplicación selectiva en cultivos hortícolas está experimentando un auge importante los últimos años. Sistemas como el de la Figura 12 en el que un equipo provisto de sensores ópticos y aplicación selectiva en cultivo de lechugas consigue unos ahorros de producto y de volumen de agua superiores al 75%. Este sistema ha sido desarrollado en el marco de un proyecto llevado a cabo por Agroscope (Haberey *et al.,* 2021) y puede observarse su funcionamiento en este enlace.

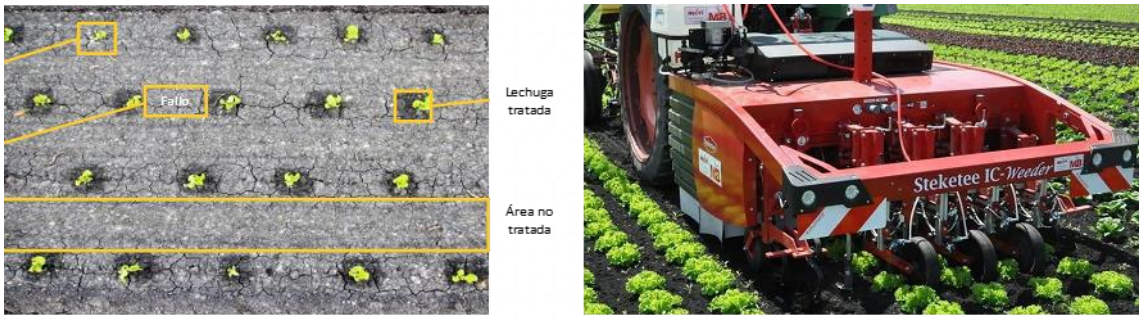


Figura 12. Equipo para aplicación selectiva de productos fitosanitarios en cultivo de lechuga. Ahorro de agua superior al 70% (fuente Haberey *et al*., 2021)

Otro ejemplo de nuevos desarrollos para tratamientos en hortícolas lo podemos observar en los equipos comercializados por la empresa Ecorobotix S.A: (https://ecorobotix.com/en/). Basados en la tecnología de aplicación con ultra bajo volumen, la combinación de sensores de alta precisión y dispositivos de aplicación de producto fitosanitario de precisión casi quirúrgica, estos nuevos y sofisticados equipos permiten aplicaciones de herbicidas a unos volúmenes de agua un 95% menores que en los tratamientos convencionales (Figura 13). La combinación de las más modernas tecnologías (boquillas distribuidas cada 4 cm, sensores ópticos de gran precisión y la incorporación en algunos casos de la inteligencia artificial para el reconocimiento de las diferentes especies de malas hierbas, sitúan a este tipo de equipos en lo más alto en cuanto a nivel tecnológico en tratamientos en cultivos hortícolas.

Figura 13. Combinación de sensores ópticos y precisión quirúrgica para la aplicación selectiva de productos fitosanitarios en cultivos hortícolas (fuente https://ecorobotix.com/en/)

La tecnología de visión y el control de la pulverización selectiva en barras de pulverización para grandes superficies es ya una realidad. Véase el ejemplo de la Figura 14, equipo provisto de cámaras hiperespectrales y actuando de acuerdo con un algoritmo previamente generado para conseguir un tratamiento selectivo *"green over green"*. El resultado, ahorro de producto fitosanitario y de agua superiores al 75%.

Figura 14. Agricultura de precisión para aplicación selectiva de productos fitosanitarios en cultivo de remolacha (fuente Corteva)

Mención especial merece en este apartado dedicado a los tratamientos en hortícolas el desarrollo de dispositivos autónomos o robots. El robot diseñado por Ecorobotix (Figura 15) recopila y analiza los datos de las plantas mediante cámaras e inteligencia artificial y aplica la pulverización de precisión de productos químicos para la protección de los cultivos, lo que reduce el uso tanto de los productos fitosanitarios como de agua en un 95%.

Figura 15. Robot de Ecorobotix para la aplicación de productos fitosanitarios en productos hortícolas

Otro innovador ejemplo de alta tecnología para la aplicación de herbicidas en cultivos en líneas lo tenemos en el robot recientemente presentado por la empresa Kilter (https://www.kiltersystems.com) Se trata de un robot pulverizador que podríamos clasificar como "aplicación ultra-precisa". Basado en la tecnología SDT (*Single Droplet technology*), el sistema funciona como una impresora de inyección de tinta, "imprimiendo" únicamente aquellos puntos específicos donde previamente un sofisticado sensor óptico es capaz de detectar la presencia de la mala hierba (Figura 16).

Figura 16. El nuevo robot autónomo desarrollado por Kilter permite una precisión milimétrica de aplicación de producto fitosanitario en cultivos hortícolas únicamente allí donde es necesario

7. Equipos para aplicación variable en cultivos frutales

Si bien la implementación de los sistemas de aplicación variable (VRA) tuvo su desarrollo e implementación hace ya algunos años en cultivos herbáceos, esta tecnología ha experimentado también un auge importante los últimos tiempos en el caso de equipos para tratamientos en frutales y viña. Las añadidas dificultades de tratamiento de estos cultivos, el elevado número de intervenciones y la absoluta necesidad de mejorar un proceso hasta ahora bastante deficitario, ha hecho que en los últimos tiempos se hayan desarrollado sistemas y equipos capaces de utilizar de forma adecuada toda la tecnología disponible para conseguir una reducción del uso de productos fitosanitarios y de agua en este tipo de cultivos, a la vez que se mejora la sostenibilidad del proceso y se reducen considerablemente los riesgos de contaminación medioambiental.

Un ejemplo de estas nuevas tecnologías es el que se ha desarrollado en el marco del proyecto de investigación PIVOS (https://pivos.upc.edu/inicio) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y coordinado por la Universitat Politècnica de Catalunya, en colaboración con la Universidad Politécnica de Valencia, la Universidad de Zaragoza y la Universidad de Córdoba. Estos cuatro grupos de investigación han desarrollado dos equipos capaces de realizar una aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de prescripción para dos grandes cultivos: viña y olivar. Los resultados alcanzados son muy alentadores, con reducciones de producto fitosanitario y ahorros de agua cercanos al 40% en el caso del viñedo, y algo inferiores en el caso del olivar. En este caso, la tecnología ha combinado el desarrollo de un software

específico para la lectura de mapas de prescripción con la implementación de boquillas de pulso variable (PWM) (Figura 17). Cabe destacar, por lo interesante de la experiencia, la colaboración de empresas del sector como Ilemo Hardi, S.A.U., Mañez y Lozano, S.A., y Teejet Technologies, quienes han puesto a disposición del proyecto los equipos para su implementación (Figura 18).

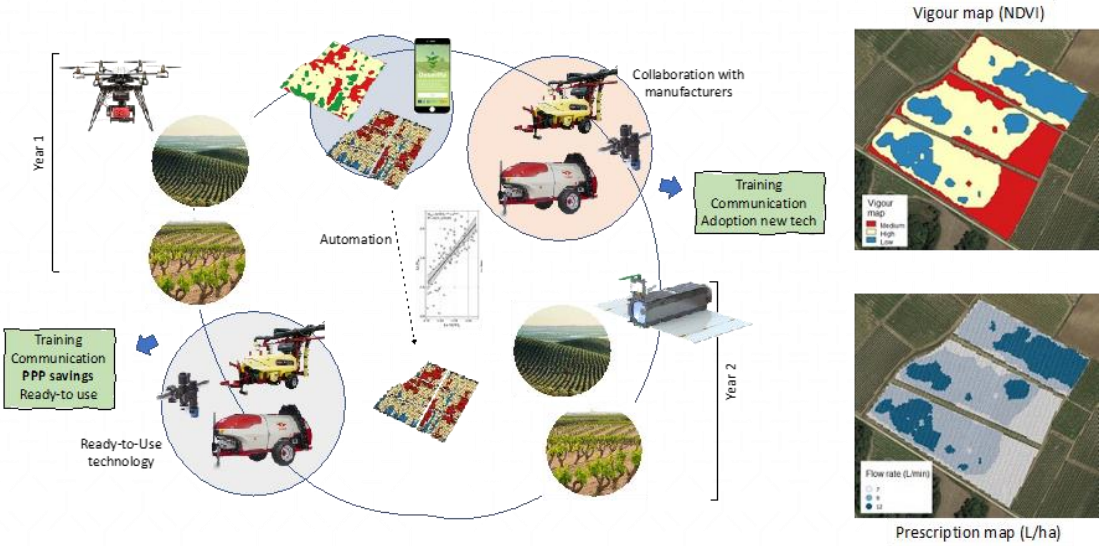


Figura 17. Esquema de funcionamiento del proyecto PIVOS- Pulverización Inteligente para viñedo y olivar sostenible, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación (https://pivos.upc.edu/inicio)

Figura 18. Equipos e instrumental empleados en el proyecto PIVOS

La aplicación variable de productos fitosanitarios en base a mapas de vegetación es ya un hecho en cultivos como el viñedo. Los últimos desarrollos llevados a cabo por el grupo de investigación de la Unidad de Mecanización Agraria de la Universitat Politècnica de Catalunya (https://uma.deab.upc.edu) se ponen de manifiesto entre otros, en los resultados obtenidos en el Grupo Operativo GOPHYTOVID (https://gophytovid.es). Ahorros de producto fitosanitario, y de agua, de hasta el 40% en función de las zonas, la tecnología empleada y el punto de partida, permiten demostrar una vez más como una adecuada implementación de las tecnologías

disponibles ayuda enormemente a conseguir los objetivos marcados por el agricultor (Figura 19).

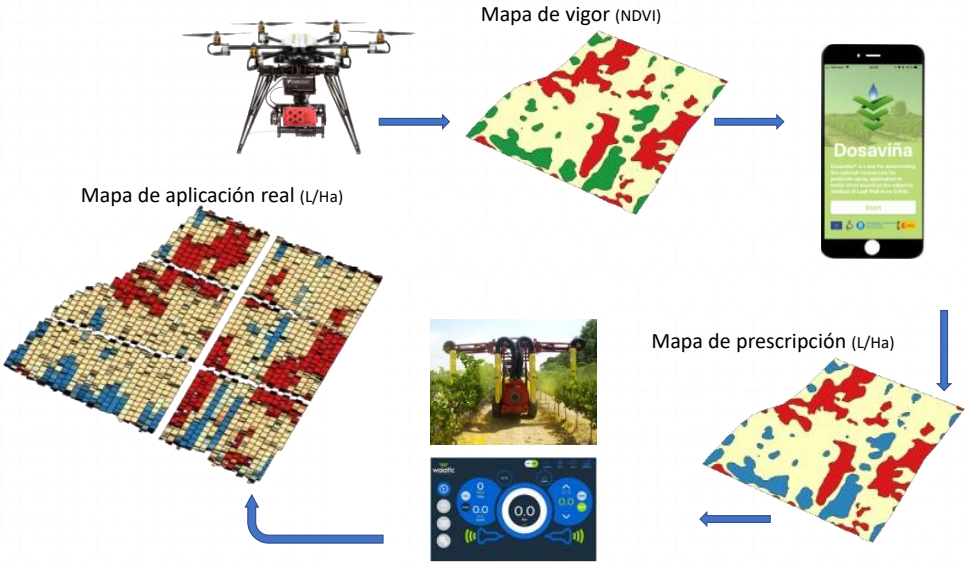


Figura 19. Sistema de aplicación variable de fitosanitarios en viña basado en mapas de prescripción desarrollado en el marco del Grupo Operativo GOPHYTOVID

La tecnología de aplicación variable puede basarse en la generación de mapas de prescripción, como hemos visto en los ejemplos anteriores, o utilizar directamente la información proporcionada por los sensores embarcados para conseguir una aplicación variable en tiempo real. Este es el caso, por ejemplo, del equipo desarrollado por la Universitat Politècnica de Catalunya en el marco del proyecto europeo OPTIMA (http://optima-h2020.eu). El sistema (Figura 20) se fundamenta en la transformación de la señal emitida por los sensores de ultrasonidos en un parámetro capaz de caracterizar la vegetación de forma adecuada. Esa señal es entonces procesada (Figura 21) y, en tiempo real, convertida a su vez en la señal eléctrica necesaria para modificar en continuo el caudal emitido por cada una de las boquillas de pulverización. El sistema ha dado hasta el momento resultados muy interesantes con reducciones de la cantidad de producto fitosanitario y de agua próximas al 40%.

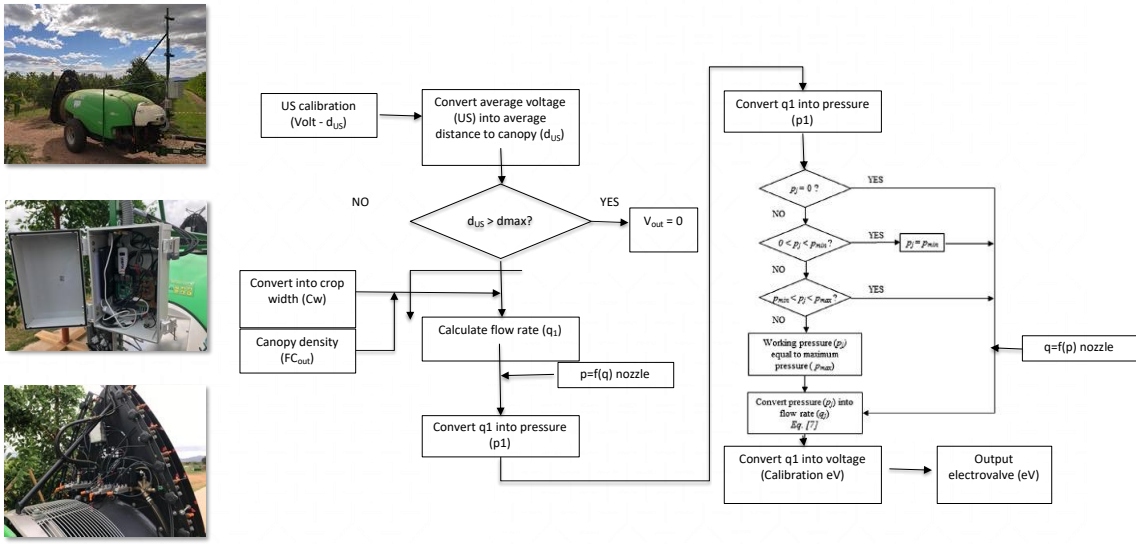


Figura 20. Caracterización de la vegetación con sensores de ultrasonidos. Equipo para aplicación variable on-line en manzanos (http://optima-h2020.eu)

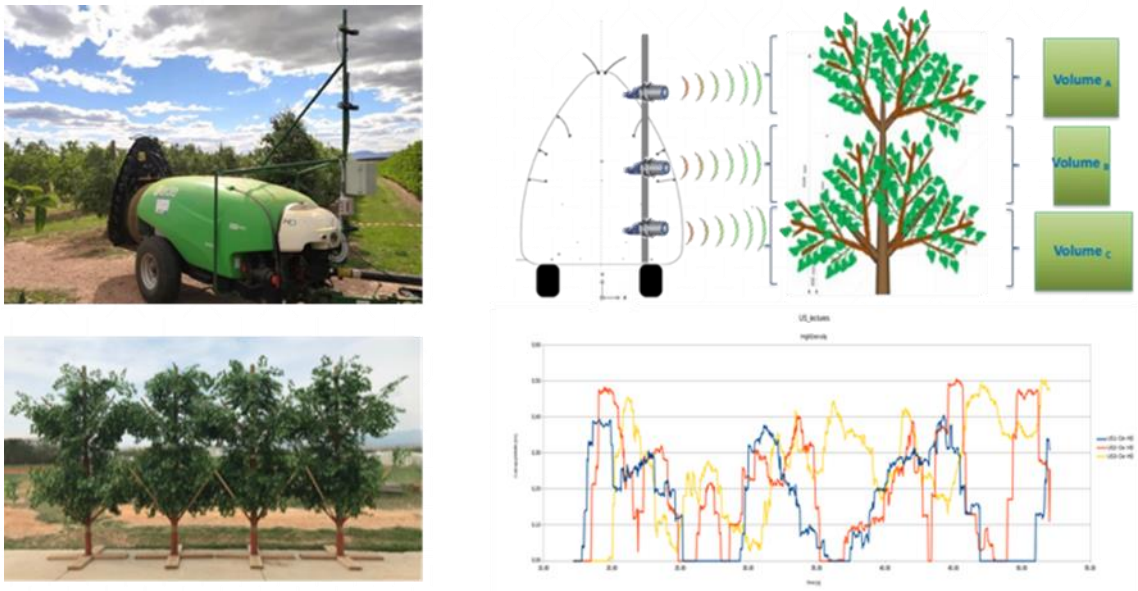


Figura 21. Adecuación de la cantidad de producto y volumen de caldo a la vegetación

8. Reducción de pérdidas y ahorro de agua

También una importante fuente de ahorro de agua durante el proceso de aplicación de productos fitosanitarios, especialmente en el caso de los cultivos arbóreos, consiste en reducir al máximo toda aquella cantidad de líquido que se pierde sin que llegue nunca al objetivo deseado. Desde el uso de tecnologías específicas y más o menos sofisticadas, como los paneles recuperadores, hasta la implementación de las buenas prácticas agrícolas y el sentido común, son también herramientas y estrategias que podemos emplear para la consecución de los objetivos establecidos. Así, desarrollos como el nuevo modelo de equipo con paneles recuperadores de Saher (https://www.saher.es) desarrollado en el marco del proyecto Sensorecufit, permite el ajuste automático de la posición de los paneles en función de las características estructurales de la vegetación. El prototipo (Figura 22) está además equipado con un sistema Waatic (https://waatic.com/es/) para la aplicación variable de producto fitosanitario en función de las características de la vegetación y un sensor conectado a un lector para la cuantificación de la cantidad de caldo recuperada por los paneles. Se trata de nuevo proyecto de investigación aplicada llevado a cabo por la unidad de Mecanización Agraria de la UPC.

Figura 22. La utilización de paneles recuperadores permite reducir considerablemente el riesgo de contaminación ambiental y mejorar la eficiencia de las aplicaciones

La adopción de criterios sostenibles durante el proceso de aplicación de productos fitosanitarios, juntamente con la evolución de los equipos de aplicación, especialmente en el caso de cultivos

arbóreos, ha derivado en numerosas ocasiones a un ahorro de volumen de agua muy considerable. La Figura 23 muestra algunos de los modelos y nuevos diseños de equipos para aplicación en frutales. Todos ellos tienen en común una característica: su adaptación a la estructura de la vegetación y la posibilidad de reducción de los volúmenes de aplicación manteniendo, e incluso aumentando, la calidad de las aplicaciones.

Figura 23. Diferentes formatos y desarrollos de equipos de aplicación para tratamientos en cultivos arbóreos

La Figura 24 muestra la cuantificación de ahorro de producto (y de agua) en función de la tecnología empleada en tratamientos en viñedo. Sin necesidad de implementar tecnologías de aplicación variable, sensores sofisticados o válvulas complicadas, la simple adecuación del equipo a las características de la vegetación puede suponer ahorros importantes de producto y de agua.

#	Tipo	Eficiencia	Reducción PPP	Riesgo de deriva	Deposición
1	Atomizador convencional	Ref	Ref	Ref	Ref
1	Atomizador convencional con BMP	+20%	-20%	-10%	+20%
2	Atomizador conv. con deflectores	+20%	-20%	-15%	+15%
3	Equipo con salidas individuales	+30%	-30%	-20%	+25%
4	Equipo multi fila	+40%	-35%	´30%	+30%
5	Equipo neumático	+40%	-30%	-15%	+10%
6	Pulverizador túnel	+50%	-40%	-40%	+30%

Figura 24. Cuantificación del efecto del tipo de máquina en ahorro de producto fitosanitario, reducción de volumen de aplicación y riesgo de contaminación

Finalmente, es necesario destacar aquí que no siempre lo que parece ser, es. Las dos imágenes que aparecen en la Figura 25 muestran sendos tratamientos aéreos en una misma parcela de olivar. El tratamiento con dron se realizó con un volumen reducido cifrado el 10 L/ha. La imagen de la derecha, que muestra un tratamiento convencional con avioneta, pudiera indicar una

aplicación con un volumen de caldo muy superior a la del dron. Sin embargo, ambos tratamientos se realizaron con la misma cantidad de agua por hectárea. Valga este ejemplo para poner de manifiesto que no es solo la tecnología empleada sino el nivel de conocimiento y el modo en que estas se utilizan los factores que llevan al éxito o al fracaso de las intervenciones.

Figura 25. Aunque parezca lo contrario, los dos equipos de la imagen, dron (izquierda) y avioneta (derecha) están aplicando la misma cantidad de agua (10 L/ha)

9. Formación y digitalización: como mejorar la adopción de las nuevas tecnologías

El Pacto Verde Europeo se ha diseñado para dar una respuesta sostenible a los retos climáticos y medioambientales, incluidos los que se plantean en la agricultura y la producción de alimentos, abordados en la Estrategia «de la granja a la mesa». Esto incluye medidas relacionadas con la reducción del uso de productos fitosanitarios, dado su potencial efecto negativo sobre la contaminación del aire y el agua, la degradación del suelo, la seguridad alimentaria y la salud humana. Sin embargo, la aplicación de estas medidas se ha convertido en un reto, especialmente para las pequeñas y medianas explotaciones, que disponen de menos recursos económicos y a menudo están dirigidas por personal poco formado. Se ha demostrado que es especialmente difícil en cultivos tridimensionales, como frutas, viñedos, olivos o cítricos, debido a sus requisitos particulares en cuanto al uso de productos fitosanitarios, las dificultades para una buena distribución de la pulverización y su influencia directa en la calidad de los alimentos. En consecuencia, hay que dedicar más esfuerzos a apoyar el uso sostenible de productos fitosanitarios para el cultivo de estos productos agrícolas, así como a apoyar a las autoridades nacionales y regionales y a las industrias auxiliares asociadas para ayudar a los agricultores a alcanzar los objetivos de sostenibilidad.

El marco legislativo europeo en torno a la protección de los cultivos y la seguridad alimentaria que afecta a todos los agricultores europeos ha evolucionado significativamente desde la publicación de la Directiva para un uso sostenible de los plaguicidas (SUD). No obstante, la adopción de algunas de las estrategias clave propuestas, como la Gestión Integrada de Plagas (GIP), la Gestión Integrada de Cultivos (GCI), la Agricultura Ecológica (AE) y las Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) siguen siendo heterogéneas, no se aplican plenamente y dependen en gran medida del tipo de cultivo, la ubicación y el tamaño de la explotación. Además, la Política Agrícola Común (PAC) ha establecido prioridades en materia de agricultura de precisión y digitalización, con el objetivo de que los agricultores aprovechen las nuevas tecnologías

disponibles, muchas de ellas derivadas de iniciativas de I+D financiadas con fondos públicos. Estas aportan soluciones para una protección segura y sostenible de los cultivos mediante dispositivos, productos, tecnologías y herramientas prácticas para ayudar a los agricultores en su rutina. Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías sigue siendo escasa y heterogénea, ya que los resultados de la I+D no llegan a los usuarios finales.

En este contexto, en el que existe un marco legislativo y una serie de nuevas tecnologías disponibles, la formación y el intercambio de conocimientos prácticos entre agricultores y asesores son fundamentales para garantizar la sostenibilidad del proceso de producción de alimentos. El marco estratégico de la UE sobre salud y seguridad en el trabajo (2021-2027) llama específicamente la atención sobre la necesidad de reforzar la formación para aumentar las competencias y la concienciación de los agricultores sobre las normas de salud y seguridad en las explotaciones, incluido el uso seguro de los productos fitosanitarios. La Comisión Europea establece claramente la importancia y los requisitos técnicos para implementar programas de formación obligatorios a lo largo de todos los Estados miembros, como una de las herramientas más importantes para mejorar el uso de los productos fitosanitarios, especialmente centrada en dos partes interesadas clave: los jóvenes agricultores y los asesores.

Con el fin de aumentar la adopción de técnicas sostenibles de protección de cultivos, acaba de ponerse en marcha el proyecto europeo RENOVATE, coordinado por la Universitat Politècnica de Catalunya. RENOVATE (www.renovateproject.eu) ofrecerá soluciones de formación renovadas que abarcarán la legislación, la sostenibilidad, las innovaciones, la protección del medio ambiente y de los operadores, y la optimización de la colaboración público-privada, a través de una red de partes interesadas en la que participarán el mundo académico, la industria, los usuarios finales y los organismos públicos.

El objetivo principal del proyecto RENOVATE es desarrollar una plataforma de formación única (Figura 26), atractiva y comprensible para mejorar el acceso de los agricultores a la formación especializada y el conocimiento listo para la práctica para lograr una protección de cultivos más sostenible, a través de la adopción de la innovación y la digitalización, la implementación eficiente de la Gestión Integrada de Plagas, apoyando la comprensión y el cumplimiento del marco legislativo de la UE. A través de una red de colaboración de socios y partes interesadas, RENOVATE dirigirá sus actividades (Figura 27) a los más importantes grupos de agentes involucrado como a) agricultores, con especial atención a los jóvenes agricultores, las mujeres y las explotaciones de tamaño familiar, que normalmente experimentan más dificultades en la adopción de nuevas tecnologías; b) asesores, como pieza clave del rompecabezas para una adecuada transferencia de conocimientos; y c) fabricantes involucrados en el proceso de aplicación de plaguicidas. RENOVATE se centrará principalmente en los cultivos especializados (frutales, viñedos, almendros, cítricos, olivos), ya que estos suelen requerir mayores cantidades de productos fitosanitarios y podrían presentar efectos más directos en términos de posibles residuos de plaguicidas encontrados en los productos finales.

Figura 26. Plataforma RENOVATE, uno de los retos a desarrollar en el nuevo proyecto europeo RENOVATE (www.renovateproject.eu)

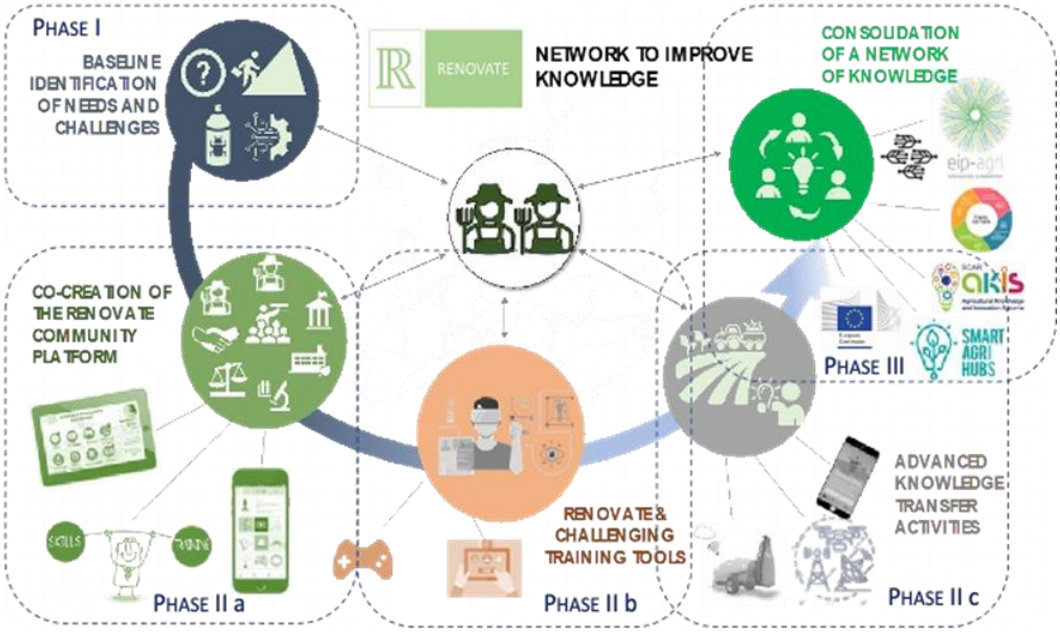


Figura 27. Organización de las acciones del proyecto RENOVATE

El proyecto RENOVATE pondrá en marcha un total de 15 estaciones **AKTA - Advanced Knowledge Transfer Activities** (Figura 28). La idea de estas estaciones AKTAs es la de aprovechar los desarrollos ya alcanzados en anteriores proyectos de investigación y de transferencia, tanto nacionales como europeos, ponerlos al alcance del usuario final, y generar material formativo actualizado a partir de la implementación de estas nuevas tecnologías ya disponibles, y poco conocidas, en un entorno real. Estas AKTAs intensificaran a su vez la colaboración entre todos los agentes involucrados, siendo un elemento fundamental para mejorar y aumentar el grado de adopción de las nuevas tecnologías en el sector.

Figura 28. Resultados de proyectos que se pondrán en funcionamiento dentro del proyecto RENOVATE

Bibliografía

Alix, A., Schartner, J. (2024). Introduction to the European Precision Application Task Force (EUPAF). In: Digital Agriculture – Regulatory and Scientific Aspects of Precision Application. Fresenius Akademie, April 2024. https://www.akademie-fresenius.com/fileadmin/SalesForce/programm_01t6M00000LAIT7QAP_00P6M00002EPXixUAH.pdf

Campos, J.; García-Ruiz, F.; Gil, E. (2021) Assessment of Vineyard Canopy Characteristics from Vigour Maps Obtained Using UAV and Satellite Imagery. Sensors, 21, 2363

Doruchowski, G., Balsari, P., Gil, E., Marucco, P., Roettele, M., Wehmann, H.J. (2014). Environmentally Optimised Sprayer (EOS) – A software application for comprehensive assessment of environmental safety features of sprayers. Science of the total Environment, 482-483: 201-207; doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.112

EPPO (European and Mediterranean Plant Protection Organization). (2021). PP 1/239 (3) Dose expresión for plant protection products. EPPO Bulletin, 51(1), 10–33.

European Commission (2009). European directive 2009/128/EC for the sustainable use of pesticides.

García-Ruiz, F., Campos, J., Llop, J. Gil, E., (2023) Assessment of map based variable rate strategies for copper reduction in hedge vineyards. Computers and Electronics in Agriculture (in press)

Gil E., Campos, J., Ortega, P., Llop J., Gras A., Armengol E., Salcedo R., Gallart M. (2019). DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 160, May 2019, Pages 117-130

Gil E., Campos, J., Ortega, P., Llop J., Gras A., Armengol E., Salcedo R., Gallart M. (2019). DOSAVIÑA: Tool to calculate the optimal volume rate and pesticide amount in vineyard spray applications based on a modified leaf wall area method. Computers and Electronics in Agriculture, Volume 160, May 2019, Pages 117-130

Gil, E., Arnó, J., Llorens, J., Sanz, R., Llop, J., Rosell-Polo, JR., Gallart, M., Escolà, A. (2014). Advanced Technologies for the Improvement of Spray Application Techniques in Spanish Viticulture: an overview. Sensors, 14(1): 691-708; doi: 10.3390/s120100691

Gil, E., Escolà, A. (2009). Design of a decision support method to determine volume rate for vineyard spraying. Applied Engineering in Agriculture, 25(2):145-151.

Gil, E., Escolà, A., Rosell, JR., Planas, S., Val, L. (2007). Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. Crop Protection, 26(8):1287-1297.

Gil, E., Llorens, J., Landers, A., Llop, J, Giralt, L. (2011). Field validation of DOSAVIÑA, a decision support system to determine the optimal volume rate for pesticide application in vineyards. European Journal of Agronomy, 35(1): 33-46

Gil, E., Llorens, J., Landers, A., Llop, J, Giralt, L. (2011). Field validation of DOSAVIÑA, a decision support system to determine the optimal volume rate for pesticide application in vineyards. European Journal of Agronomy, 35(1): 33-46;

Gil, E.; Salcedo, R.; Soler, A.; Ortega, P.; Llop, J.; Campos, J.; Oliva, J. (2021). Relative efficiencies of experimental and conventional foliar sprayers and assessment of optimal LWA spray volumes in trellised wine grapes. Pest management science. DOI:10.1002/ps.6276

Gil, E. (2024). Precision application in 3d-technology vs regulatory needs. The PPP dose expression dilemma. In: Digital Agriculture – Regulatory and Scientific Aspects of Precision Application. Fresenius Akademie, April 2024. https://www.akademie-fresenius.com/fileadmin/SalesForce/programm_01t6M00000LAIT7QAP_00P6M00002EPXixUAH.pdf

Grella, M., Gallart, M., Marucco, P., Gil, E. (2017). Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard influence of environmental variables and sprayer settings. Sustainability 9(5):728. doi: 10.3390/su9050728

Grella, M., Gil, E., Balsari, P., Marucco, P., Gallart, M., (2017). Advances in developing a new test method to assess spray drift potential from air blast sprayers. Spanish Journal of Agricultural Engineering 15(3) e0207. https://doi.org/10.5424/sjar/2017153-10580

Grella, M., Gil, E., Balsari, P., Marucco, P., Gallart, M. (2017). Advances in developing a new test method to assess spray drift potential from air blast sprayers. Spanish Journal of Agricultural Engineering 15(3) e0207. Doruchowski, G., Balsari, P., Gil, E., Marucco, P., Roettele, M., Wehmann, H.J. 2014. Environmentally Optimised Sprayer (EOS) – A software application for comprehensive assessment of environmental safety features of sprayers. Science of the total Environment, 482-483: 201-207; doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.112

Guth, V. (2024). Example of a spot application in sugar beet: linking the practice to the GAP table and implications for the risk assessment. In: Digital Agriculture – Regulatory and Scientific Aspects of Precision Application. Fresenius Akademie, April 2024

Keller, M. (2024). Spot spraying in vegetables: applied research with an interdisciplinary approach. In: Digital Agriculture – Regulatory and Scientific Aspects of Precision Application. Fresenius Akademie, April 2024. https://www.akademie-fresenius.com/fileadmin/SalesForce/programm_01t6M00000LAIT7QAP_00P6M00002EPXixUAH.pdf

Haberey, P., Hodel, D., Collet, L., Bucher, C., Anken, T., Total, R., Keller, M. (2021). Efficiency evaluation of automated insecticide sopt spraying in lettuce and bok choy fields. In: Precision Agriculture 21 - https://doi.org/10.3920/978-90-8686-916-9_13

Jamar, L., Mostade, O., Huyghebaert, B., Pigeon, O., Lateur, M. (2010). Comparative performance of recycling tunnel and conventional sprayers using standard and drift-mitigating nozzles in dwarf apple orchards. Crop Protection, 29(6), 561-566.

Llorens, J., Gil, E., Llop, J, Escolà, A. (2010). Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. Crop Protection, 29(3): 239-248; doi:10.1016/j.cropro.2009.12.022

Llorens, J., Gil, E., Llop, J., Queraltó, M. (2011). Georeferenced LIDAR 3D Map Generation of Vine Plantations. Sensors 11(6): 6237-6256; doi:10.3390/s110606237

Miranda-Fuentes, A.; Llorens, J.; Gamarra-Diezma, J.L.; Gil-Ribes, J.A.; Gil, E. (2015)Towards an Optimized Method of Olive Tree Crown Volume Measurement. Sensors, 15, 3671-3687. https://doi.org/10.3390/s150203671

Salcedo, R., Llop, J., Cabrera, C., Campos, J., Ortega, P., Gil., E. (2023) Comparing the efficiency of two axial-fan tower sprayers during pear tree treatments by integrating a DSS into the spray system. Spanish Journal of Agriculture Research (submitted)

Salcedo, R., Zhu, H., Ozkan, E., Falchieri, D., Zhang, Z., Wei, Z. (2021). Reducing ground and airborne drift losses in young apple orchards with PWM-controlled spray systems. Computers and Electronics in Agriculture, 189, 106389.

Wei, Z., Xue, X., Salcedo, R., Zhang, Z., Gil, E., Sun, Y., Zhang, Y. (2022). Key Technologies for an Orchard Variable-Rate Sprayer: Current Status and Future Prospects. Agronomy, 13(1), 59.

Xun, L., Campos, J., Salas, B., Fábregas, F. X., Zhu, H., Gil., E. (2023). Advanced spraying system for apple orchards: potential improvements in pesticide saving and spray drift reduction. Precision Agriculture

Xun, L., Campos, J., Salas, B., Fábregas, F. X., Zhu, H., Gil., E. (2023). Advanced spraying system for apple orchards: potential improvements in pesticide saving and spray drift reduction. Precision Agriculture (in press).

Xun, L., García-Ruiz, F., Fábregas, F. X., Gil, E. (2022). Pesticide dose based on canopy characteristics in apple trees: Reducing environmental risk by reducing the amount of pesticide while maintaining pest and disease control efficacy. Science of the Total Environment, 826, 154204. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154204

4.4. Programas de mejora de portainjertos en hortícolas: alcanzar la tolerancia a estrés hídrico es posible

Yaiza G. Padilla[1], Ramón Gisbert-Mullor[2], Salvador López-Galarza[2], Ángeles Catalayud[1]

[1] *Departamento de Horticultura, Centro de Citricultura y Producción Vegetal, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)*

[2.] *Departamento de Producción Vegetal, CVER, Universitat Politècnica de València (UPV)*

* padilla_yai@gva.es

Índice

1. Complejidad de los programas de mejora para estreses abióticos 392

1.1. Historia de la mejora vegetal 392

1.2. Mejora para estreses abióticos 393

2. Portainjertos como herramienta para la tolerancia. La importancia de la compatibilidad patrón-variedad 395

2.1. Definición y breve historia del injerto 395

2.2. Procedimiento del injerto en hortícolas 395

2.3. Compatibilidad vs Incompatibilidad 396

2.4. Mecanismos de tolerancia a estrés hídrico en plantas injertadas 396

2.5. Resumen ventajas y desventajas del injerto 398

3. Fases del programa de mejora para la obtención de portainjertos de pimiento tolerantes a estrés hídrico del IVIA-UPV 398

3.1. Selección de material vegetal de partida 399

3.2. Evaluación del material – screening 399

3.3. Evaluación de accesiones como portainjertos 401

3.4. Selección de parentales y obtención de híbridos 402

3.5. Evaluación de híbridos como portainjertos 403

3.6. Ensayo en distintas localizaciones con estrés ambiental real 404

3.7. Registro de la nueva obtención vegetal 404

Resumen

Los estreses abióticos, entre los que se encuentra el estrés hídrico, aumentan en prevalencia y severidad cada año con el cambio climático, lo que ocasiona grandes pérdidas en el sector agrícola y especialmente en la región mediterránea. La mejora vegetal para alcanzar la tolerancia a estreses abióticos es un objetivo clave difícilmente abordable a corto y medio plazo, debido a

distintos factores asociados a la complejidad de estos estreses. Por un lado, evaluar la respuesta de tolerancia es un proceso complicado no estandarizado, pues depende del estadio de desarrollo y de la prevalencia e intensidad del estrés. Por otro lado, la tolerancia depende de la combinación de varios caracteres poligénicos y su interacción con el ambiente. Ante esta situación, la técnica del injerto constituye un recurso eficaz para hacer frente a las consecuencias de los estreses abióticos que ya se está empleando en hortícolas. Esta estrategia consiste en la unión de un patrón, que proporciona tolerancia a estreses abióticos, con una variedad que presenta características de interés agronómico y comercial. Así, la mejora se realiza sobre los patrones para desarrollar material vegetal tolerante a estreses abióticos y se combina con la variedad, para que sus caracteres deseables no se vean afectados negativamente por el estrés. En este contexto cobra importancia el concepto de compatibilidad patrón-variedad, ya que la incompatibilidad ocasionará problemas en el desarrollo de las plantas que podrían resultar en un crecimiento y desarrollo inadecuado o incluso en la muerte de las plantas. Si patrón y variedad son compatibles, las conexiones vasculares permitirán el flujo óptimo de agua y nutrientes y el desarrollo integral de las plantas, todo ello mediado por la señalización hormonal para minimizar el estrés oxidativo. Esta comunicación entre patrón y variedad es fundamental en la respuesta de tolerancia. En el caso de estrés hídrico, algunas de las características clave en los portainjertos para cultivos hortícolas injertados incluyen un sistema radicular voluminoso, mayor captación de agua y nutrientes, la activación del sistema antioxidante y la señalización hormonal, el mantenimiento de la actividad fotosintética en la variedad y la comunicación a larga distancia, que se da de forma bidireccional. Todos estos atributos permiten a la variedad soslayar los efectos negativos del estrés hídrico. Por ello, durante el desarrollo de programas de mejora de patrones es importante estudiar los mecanismos de tolerancia a estrés hídrico para facilitar la labor de los mejoradores en la obtención de portainjertos tolerantes. En el contexto del programa de mejora UPV-IVIA se ha obtenido y registrado el portainjerto híbrido de pimiento NIBER® tolerante a estrés hídrico, que permite obtener mayor rendimiento respecto a la variedad sin injertar en condiciones de estrés hídrico. Este programa de mejora UPV-IVIA cuenta con las siguientes fases: i) selección de material vegetal de partida (accesiones), ii) evaluación del material vegetal (screening), iii) evaluación de las accesiones como portainjertos, iv) selección de parentales y obtención de híbridos, v) evaluación de híbridos como portainjertos, vi) ensayo en distintas localizaciones con estrés ambiental real y vii) registro de la nueva obtención vegetal, siendo esta última fase necesaria para la comercialización de la obtención vegetal.

1. Complejidad de los programas de mejora para estreses abióticos

1.1. Historia de la mejora vegetal

La mejora vegetal surgió de la necesidad humana de aumentar el rendimiento, la calidad y/o reducir los costes productivos en los cultivos dando lugar a la domesticación de plantas por medio de la selección artificial de características de interés. En el siglo XV, con los viajes intercontinentales los europeos introdujeron en sus lugares de origen plantas de otros territorios (principalmente de América), aumentando en gran medida la diversidad. Posteriormente, los experimentos de Mendel (siglo XIX) abrieron el camino a la mejora genética

en el ámbito científico, siguiendo con la Revolución Verde (principios del siglo XX) hasta las técnicas moleculares de mejora genética que se emplean hoy en día (Cubero, 2013; Schlegel, 2007).

El punto de partida de un programa de mejora es la existencia de variación genética, pues sin ella no es posible realizar la mejora del cultivo de interés (Singh et al., 2023). Para solventar esta falta de variación el mejorador puede cruzar la variedad a mejorar con otra que presente las características deseables, con material genético de distinta procedencia o emplear variedades tradicionales, que representan una población de individuos con gran variabilidad. Una vez se obtiene variabilidad, se identifican características clave y se realiza la selección de los caracteres deseados.

Cabe mencionar que la diversidad genética (G) interacciona con el ambiente (E), obteniendo la diversidad fenotípica (F = G x E). Este componente ambiental debe tenerse en cuenta en el desarrollo de los programas de mejora, ya que en ocasiones es responsable en gran medida del fenotipo observado, debido a una adaptación de la variedad al ambiente.

Tradicionalmente la mejora genética en vegetales se ha dirigido hacia un mayor rendimiento del cultivo (precocidad, resistencia a plagas y enfermedades, hábitos de crecimiento) siguiendo con la mejora para caracteres del fruto exigidos por la cadena de suministro y con gran influencia en el consumidor (homogeneidad, gran tamaño, brillo, calidad para el transporte y envasado, etc.). Recientemente, los objetivos de mejora en hortícolas muestran una tendencia a la calidad organoléptica interna y nutricional del fruto (sabor, aroma, textura, compuestos nutracéuticos, etc.) dado el interés del consumidor, ya que se dejó de lado por la mejora de otros caracteres como el tamaño o uniformidad del fruto (Folta y Klee, 2016) (Figura 1).

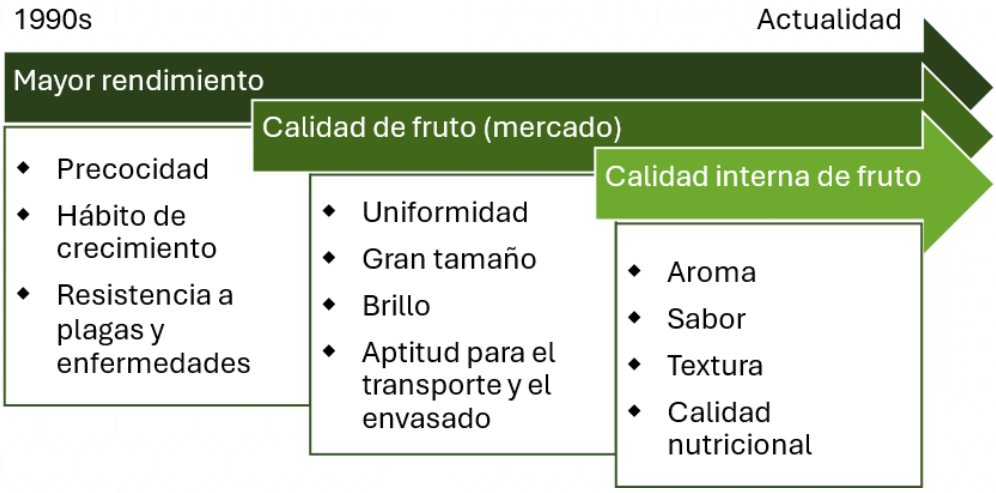


Figura 1. Esquema de la evolución de los objetivos de mejora en cultivos hortícolas desde los años 90 a la actualidad

1.2. Mejora para estreses abióticos

Las pérdidas en producción debido a sequía, salinidad y temperaturas extremas, entre otros, aumentan cada año a nivel mundial (Sah et al., 2016; Wang et al., 2003) y en concreto en la cuenca mediterránea (UNEPMAP, 2020). Los agricultores demandan soluciones para hacer frente a los estreses abióticos y mantener los rendimientos en un contexto climático que acelera la pérdida de terreno cultivable (FAO, 2024). Estas circunstancias amenazan la seguridad

alimentaria, pudiendo provocar una crisis de abastecimiento de alimentos en un futuro próximo (Foley et al., 2011). Por ello, la mejora orientada a la tolerancia a estreses abióticos cada vez cobra más importancia.

Pese a la gravedad de la situación en la que se encuentra el sector agrícola, la consecución de los programas de mejora convencional para estreses abióticos no se logra a corto y medio plazo (Hu & Xiong, 2014; Kumar et al., 2020; Rivero et al., 2021). El retraso en el desarrollo de variedades tolerantes a estreses abióticos se debe a diversos factores inherentes a la naturaleza de estos estreses:

- Dificultad para evaluar la tolerancia o sensibilidad al estrés: ausencia de parámetros estandarizados de evaluación, dependencia del estadio de desarrollo del cultivo, así como de la severidad y duración del estrés.
- La tolerancia está asociada a la combinación de muchos caracteres, los cuales no están controlados por un único gen (monogénicos), sino por varios genes (poligénicos). El efecto de estos genes depende de la interacción entre los mismos, con el ambiente y las prácticas de cultivo.

Estas dificultades han promovido los estudios con plantas transgénicas en las últimas décadas. Sin embargo, son muy pocos los cultivos transgénicos que se llegan a comercializar. Dejando de lado las restricciones legales, esto se debe a que en muchos casos se emplean plantas modelo como Arabidopsis o tabaco como base para obtener plantas tolerantes a estreses abióticos. Además, se estudian en sistemas artificiales de cultivo que poco tienen que ver con las condiciones de estrés real. Por un lado, no es sencillo transferir los resultados de plantas modelo a los principales cultivos (Mittler, 2006) y, por otro lado, imitar las condiciones de estrés siempre conlleva cierto error, se pierde la interacción con todos los elementos del ambiente real de cultivo.

En este sentido, es muy importante la transferencia de los estudios en condiciones controladas de laboratorio y/o invernadero a las condiciones de estrés ambiental real. Dado que es frecuente encontrar interacciones con otros estreses abióticos, e incluso bióticos en el campo, es necesario realizar ensayos en las condiciones del área objeto de cultivo, incluyendo parcelas en distintas localizaciones para observar la interacción del genotipo con el ambiente. Estos ensayos han de repetirse durante varios años para constatar la tolerancia de la variedad mejorada, mediante el estudio del rendimiento y calidad del fruto.

Dada la complejidad de los programas de mejora frente a los estreses abióticos, surge la necesidad de estudiar los mecanismos de tolerancia a dichos estreses para poder ser más eficientes en la selección y desarrollo de variedades tolerantes. Es muy importante conocer las respuestas al estrés en el cultivo objetivo, para poder identificar caracteres clave involucrados en la tolerancia que sean útiles en el desarrollo de un ideotipo. La caracterización de los mecanismos de respuesta al estrés comprende distintos niveles: agronómico, morfo-anatómico, fisiológico, bioquímico, metabolómico, transcriptómico, etc., y la integración de todos ellos es lo que permite conocer profundamente los mecanismos de tolerancia al estrés. Los dos últimos niveles mencionados, junto con otros (proteómica, ionómica, lipidómica, …) pertenecen a las ciencias ómicas, que han supuesto un gran avance en el conocimiento acerca de los mecanismos

implicados en los estreses abióticos y sus rutas de señalización, facilitando la tarea de los mejoradores.

Una estrategia para solventar los problemas asociados a la mejora para estreses abióticos es el uso de portainjertos tolerantes a estos estreses, que en el caso de hortícolas se ha empleado en Solanáceas y Cucurbitáceas (Kyriacou et al., 2017). Mediante la técnica del injerto se une la variedad deseada con el patrón que presenta tolerancia a uno o varios estreses abióticos. De esta forma, no se requiere la obtención de variedades mejoradas para características vegetativas de la parte aérea o relacionadas con los frutos, sino que la mejora se realiza en los portainjertos lo cual requiere un menor tiempo de obtención. En la mejora de patrones se cuenta con gran cantidad y variabilidad de germoplasma de partida para la búsqueda de accesiones tolerantes a estreses abióticos, siempre que exista compatibilidad con la variedad, concepto que se desarrolla en el apartado 2.3.

2. Portainjertos como herramienta para la tolerancia. La importancia de la compatibilidad patrón-variedad

2.1. Definición y breve historia del injerto

El injerto es una técnica agronómica que consiste en la unión de dos plantas, la variedad, que constituye la parte aérea y el portainjerto o patrón que proporciona el sistema radicular. La historia de la técnica del injerto se remonta a hace más de dos mil años con su uso en árboles frutales y se ha extendido a los cultivos hortícolas en el último siglo (Bie et al., 2017). Concretamente, en la década de 1950 el auge de los invernaderos llevó al abandono de los sistemas de rotación por una ampliación de los ciclos de cultivo, lo que ocasionó un aumento en las enfermedades del suelo. Así, se popularizó el injerto como solución a los patógenos y problemas sanitarios del suelo, entre otros estreses bióticos (Lee et al., 2010; Schwarz et al., 2010).

Actualmente, su uso no solo se limita a paliar los estreses bióticos, sino que es una herramienta muy eficaz para combatir los estreses abióticos (Kyriacou et al., 2017; Rouphael et al., 2018). En la actualidad en hortícolas, predominan los estudios enfocados en la búsqueda de la tolerancia a estreses ambientales y en la fisiología del injerto en solanáceas y cucurbitáceas, que se cultivan como plantas injertadas mayoritariamente en el continente europeo, asiático y norteamericano (Gaion et al., 2018; Goldschmidt, 2014).

Según datos de la Comisión Europea en 2010, España es el país líder en producción de plantas hortícolas injertadas de Europa, con 129 millones de plantas, seguido de Italia (47 millones) y Francia (28 millones) (Michel et al., 2015).

2.2. Procedimiento del injerto en hortícolas

¿Cómo se realiza?

En primer lugar, se realiza la selección del material vegetal que actuará como portainjerto y como variedad, teniendo en cuenta las características de cada uno de ellos. Después, se realiza un corte y ambos materiales se unen físicamente, normalmente de forma manual, aunque puede realizarse de forma automática con máquinas y robots especializados (Bie et al., 2017).

En este paso interviene la compatibilidad patrón-variedad, si ambos materiales son compatibles la unión será estable y funcionará como una única planta. Por el contrario, si los materiales son incompatibles la unión será discontinua y las plantas terminarán muriendo. En el caso de compatibilidad, variedad y portainjerto quedan conectados por medio de sus sistemas vasculares, tras lo cual las plantas injertadas pueden ser trasplantadas a invernadero o campo.

Existen múltiples técnicas para realizar el injerto y su elección depende de varios factores como el cultivo, la experiencia técnica previa, el número de plantas injertadas que se necesitan, el objetivo de realizar injertos, las instalaciones, maquinaria y la mano de obra disponible, entre otros (Colla et al., 2017; Lee et al., 2010).

2.3. Compatibilidad vs Incompatibilidad

La importancia de la compatibilidad del injerto es tal que existen grupos de investigación dedicados al estudio de los mecanismos que regulan esta compatibilidad para poder ser más eficientes en el uso del injerto. En un primer momento de la unión patrón-variedad se produce una banda necrótica en el punto de contacto de ambos materiales, y se inicia una proliferación celular en forma de callo, en el que se diferenciarán posteriormente los haces vasculares para conectarse en forma de puentes de unión, lo que permitirá establecer una conexión vascular funcional en la interfaz del injerto (Pina et al., 2017).

En el caso de una incompatibilidad patrón/variedad, tras la formación de la banda necrótica se produce la senescencia de las células en la superficie del injerto, lo que se puede observar con la suberización en la zona de unión, cuyas células terminan colapsando y muriendo (Pina et al., 2017). Así, no existen conexiones vasculares que posibiliten un flujo adecuado de agua y nutrientes entre el portainjerto y la variedad, ni tampoco un intercambio de moléculas de señalización a través de la unión del injerto (Trinchera et al., 2013). En los casos más graves de incompatibilidad, estas dificultades terminan con la muerte de las plantas.

La señalización hormonal tiene gran influencia en la manifestación de la compatibilidad o incompatibilidad en las distintas etapas del injerto. En el momento de la unión, la liberación de auxinas desde los haces vasculares del patrón y la variedad favorece la diferenciación de los tejidos vasculares en la unión patrón-variedad y facilita la compatibilidad (Wulf et al., 2019). Una vez se ha establecido la conexión entre ambos materiales, se produce una traslocación de auxinas desde la variedad, donde son sintetizadas, a las raíces del patrón para promover su crecimiento. Sin embargo, cuando la concentración de auxinas supera un umbral crítico, se induce la producción de etileno que puede causar estrés oxidativo en el patrón por producción de ROS (especies reactivas del oxígeno), inhibición del crecimiento y deterioro de las raíces (Aloni et al., 2008). En el caso de una unión compatible, el exceso de ROS se contrarresta con la producción de compuestos antioxidantes y la activación de enzimas antioxidantes, minimizando los efectos del estrés oxidativo (Aloni et al., 2010).

2.4. Mecanismos de tolerancia a estrés hídrico en plantas injertadas

La tolerancia que muestran las plantas hortícolas injertadas a los estreses abióticos es debida a la capacidad del portainjerto para sobreponerse a las condiciones de estrés y sobrevivir a las mismas (Rivero et al., 2003). Específicamente, la tolerancia a estrés hídrico en plantas hortícolas injertadas se lbasa en los siguientes atributos:

- **Sistema radicular grande y robusto.** En pimiento, Gisbert-Mullor et al. (2023) cuantificaron un mayor volumen radicular en planta injertada utilizando el portainjerto NIBER® respecto a la variedad sin injertar; en el caso de López-Serrano et al. (2019), la variedad "Adige" injertada sobre la accesión "A25" produjo mayor biomasa radicular en comparación con la variedad sin injertar. En tomate, Zhang et al. (2020) constataron mayor crecimiento de las raíces en plantas de tomate injertadas sobre el genotipo tolerante "606" en condiciones de estrés hídrico.
- **Mayor capacidad de absorción de agua y nutrientes**. Esta ventaja está relacionada con caracteres específicos de las raíces del portainjerto, como su arquitectura, que permite mejorar la obtención de recursos en condiciones limitantes (Ghanem et al., 2011). En sandía, el injerto de dos variedades sobre el patrón tolerante "PS 1313" favoreció la absorción de agua y un mejor estado nutricional respecto a las variedades sin injertar en condiciones de déficit hídrico (Rouphael et al., 2008).
- **Mayor actividad fotosintética en la variedad.** La fotosíntesis se ve comprometida o inhibida en condiciones de estrés hídrico, el uso de portainjertos tolerantes permite minimizar el descenso de la tasa fotosintética en comparación con la variedad sin injertar en pimiento (López-Marín et al., 2017; Penella et al., 2017; Sae-Tang y Nawata, 2019) y tomate (Zhang et al., 2019).
- **Estimulación del sistema antioxidante.** Para contrarrestar el aumento de Especies Reactivas del Oxígeno (ROS), el injerto de pimiento sobre el patrón tolerante "H92" estimuló la actividad de enzimas antioxidantes (CAT, catalasa) y la síntesis de compuestos antioxidantes (ácido ascórbico) (Padilla et al., 2021). En cuanto al tomate, el injerto sobre patrones tolerantes al estrés hídrico alivió el daño oxidativo por medio de la regulación de enzimas antioxidantes como SOD (superóxido dismutasa) y CAT (Sánchez-Rodríguez et al., 2012; Zhang et al., 2019). La activación del sistema antioxidante como respuesta al estrés se genera desde el patrón, son las raíces los primeros órganos en percibir el estrés hídrico (Mia et al., 2020) y transmitir la señal hacia la variedad (Yang et al., 2022).
- **Activación de la red de señalización hormonal**. Cantero-Navarro et al. (2016) constataron en tomate que el patrón influye en la señalización hormonal desde la raíz a la parte aérea, entre otros, con el aumento de ACC (ácido 1-aminociclopropano 1-carboxílico) en raíces que se traduce en menor área de la hoja y mayor productividad. En el caso del pepino injertado sobre Luffa en condiciones de estrés hídrico, se ha observado un aumento de ABA (ácido abscísico) en raíces, xilema y hojas junto con la reducción de la apertura estomática y la transpiración (Liu et al., 2016). La tolerancia a estrés hídrico en pimiento injertado sobre el patrón NIBER® se relacionó con la modulación del balance hormonal en raíces y hojas, con el incremento en ABA, ACC, JA (ácido jasmónico), SA (ácido salicílico) y un mayor cierre estomático (Padilla et al., 2023a).
- **Transmisión de señales a larga distancia** (mRNAs, pequeños RNAs y proteínas). En pepino injertado sobre calabaza se identificaron mRNAs móviles asociados mayoritariamente con la fotosíntesis, relacionado con el aumento del contenido en clorofila y la eficiencia fotoquímica del fotosistema II; así como HSP70 (heat shock protein) de calabaza, lo que demuestra la transmisión de la señal de estrés del patrón a la variedad (Davoudi et al., 2022). En las raíces del patrón de pimiento tolerante NIBER®

tres factores de transcripción (FTs) DREB y el FT MYC2 se sobreexpresan en estrés hídrico respecto a condiciones control, estos FTs tienen relación con la señalización por ABA y JA (Padilla et al., 2023b) . Los FTs interaccionan con elementos de la región promotora de genes de respuesta a estrés, regulando la expresión de múltiples genes asociados.

Existe un intercambio de información bidireccional, del patrón a la variedad y viceversa que posibilita la regulación genética y fisiológica de los mecanismos de respuesta al estrés (Tsaballa et al., 2021). Estos mecanismos alivian la percepción del estrés hídrico en la variedad injertada debido a la tolerancia del patrón, obteniendo mayor rendimiento en condiciones adversas (Figura 3).

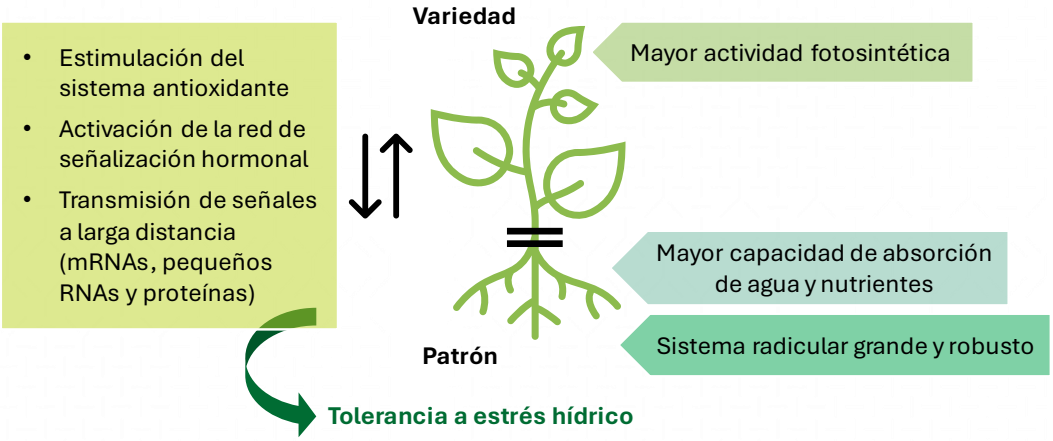


Figura 3. Mecanismos de tolerancia a estrés hídrico en plantas hortícolas injertadas

2.5. Resumen ventajas y desventajas del injerto

Esta técnica presenta claras ventajas, pero también algunos inconvenientes que han de tenerse en cuenta antes de emplear plantas injertadas (Tabla 1, (Lee et al., 2010)).

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la utilización de la técnica del injerto

Ventajas	Desventajas
Mayor rendimiento	Coste de dos semillas: patrón y variedad
Menor uso de fertilizantes y agua de riego	Coste de la técnica del injerto
Menor uso de fitosanitarios	Problemas de incompatibilidad
Tolerancia a estreses bióticos y abióticos	Disponibilidad reducida de portainjertos comerciales tolerantes a estreses abióticos
Extensión del ciclo de cultivo	

3. Fases del programa de mejora para la obtención de portainjertos de pimiento tolerantes a estrés hídrico del IVIA-UPV

El programa de mejora clásica desarrollado en el Departamento de Horticultura (IVIA) y el Departamento de Producción Vegetal (UPV) (Figura 4) cuenta con las siguientes fases para el desarrollo de patrones tolerantes a estrés hídrico:

1. Selección de material vegetal de partida (accesiones).
2. Evaluación del material vegetal (screening)
3. Evaluación de las accesiones como portainjertos
4. Selección de parentales y obtención de híbridos
5. Evaluación de híbridos como portainjertos
6. Ensayo en distintas localizaciones con estrés ambiental real
7. Registro de la nueva obtención vegetal

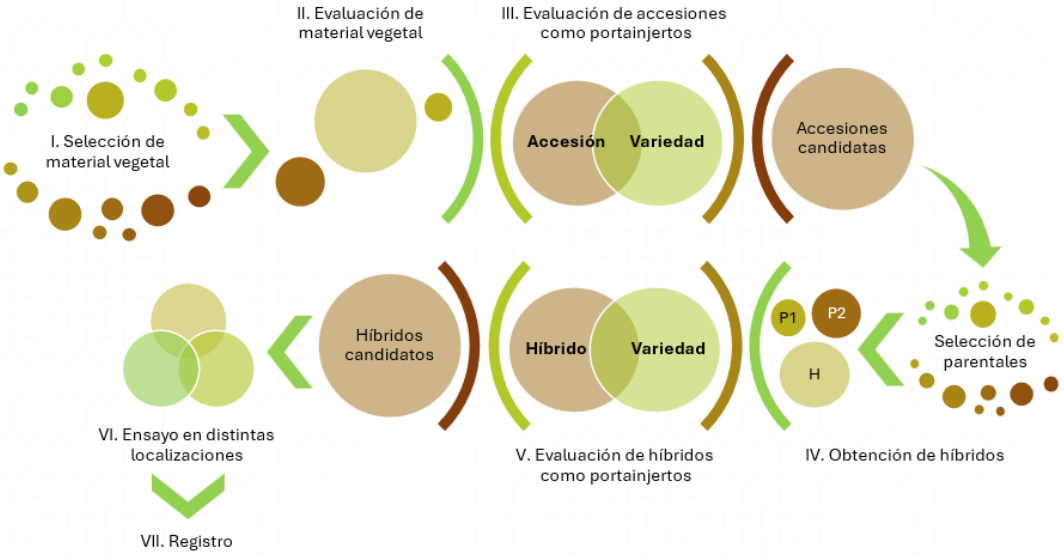


Figura 4. Esquema de las fases del programa de mejora de portainjertos de pimiento tolerantes a estrés hídrico del IVIA-UPV

3.1. Selección de material vegetal de partida

La primera fase es la búsqueda en bancos de germoplasma (en nuestro caso el banco de la UPV-COMAV) atendiendo a la eco-fisiología de accesiones del género *Capsicum* según sus datos de pasaporte, para poder seleccionar las accesiones candidatas con mayor potencial para la tolerancia a estrés hídrico.

Los bancos de germoplasma conservan material vegetal que puede ser solicitado por entidades públicas y privadas, así como particulares, de acuerdo con los acuerdos y tratados internacionales para favorecer la preservación del material, el intercambio y el avance del conocimiento científico.

Se selecciona un gran número de accesiones para el primer cribado, de esa forma se asegura que haya éxito en la búsqueda de tolerancia cuando sean cultivadas en condiciones de estrés hídrico.

3.2. Evaluación del material – screening

Una vez se han seleccionado las accesiones, se debe evaluar su respuesta en condiciones de estrés hídrico para poder determinar su tolerancia o sensibilidad. La evaluación inicial ha de ser muy eficiente para poder realizar “screenings” con un gran número de accesiones en el mínimo tiempo posible. En el caso del pimiento, en el IVIA-UPV hemos seleccionado los biomarcadores a evaluar en esta primera etapa para elegir los mejores candidatos. Así, en una primera evaluación hay dos puntos clave:

- Las condiciones de cultivo
- Los parámetros a evaluar

En el caso de estrés hídrico y la selección de patrones de pimiento tolerantes, los ensayos se realizan en condiciones controladas de invernadero, en contenedores y aplicando un déficit hídrico que puede variar entre el 50%-70% de la evapotranspiración de cultivo (ETc) comparando con las accesiones en situación control regadas al 100% ETc. El invernadero del que se dispone permite el desarrollo del tratamiento de estrés hídrico y control simultáneamente para un elevado número de plantas (Figura 5). Los niveles de humedad en el sustrato son monitoreados por sensores de capacitancia conectados a un registrador de datos. De este modo, se mantiene la humedad del sustrato al 100 % de VSWC (contenido volumétrico de agua del suelo, expresado como el porcentaje de la capacidad de campo para reducir la importancia de la calibración del sensor) para condiciones control y al 70 % de VSWC para condiciones de estrés hídrico.

Figura 5. Screening de accesiones en el invernadero del IVIA para seleccionar accesiones tolerantes en condiciones de estrés hídrico

La primera selección de accesiones tolerantes al estrés hídrico se realiza en base a los efectos del estrés medidos con parámetros fisiológicos que han demostrado su sensibilidad para diagnosticar la tolerancia:

- Intercambio gaseoso atendiendo a tasa fotosintética, conductancia estomática, transpiración y eficiencia en el uso del agua.
- Relaciones hídricas (potencial hídrico).
- Biomasa aérea

Los resultados obtenidos se tratan estadísticamente, analizando si los parámetros se ven afectados en condiciones de estrés hídrico respecto a las condiciones control para cada una de las accesiones.

Con esta evaluación conseguimos reducir el número de accesiones candidatas, seleccionando aquellas con potencial tolerancia al estrés hídrico, que nos deja un margen suficiente para evaluar su papel como portainjertos en la siguiente etapa del programa.

3.3. Evaluación de accesiones como portainjertos

La segunda evaluación consiste en comprobar el efecto de las accesiones seleccionadas utilizadas como portainjertos, ya que si existe incompatibilidad serán descartadas, aunque su respuesta en condiciones de estrés hídrico fuera muy prometedora. ¿Por qué esta evaluación no se realiza en primer lugar si es un paso limitante? La técnica del injerto, como se explica en el apartado 2, conlleva un gasto extra porque se necesitan semillas de ambos materiales (patrón y variedad) sumado al propio coste de la técnica. Por ello, el primer cribado con un gran número de accesiones se realiza con plantas sin injertar, y ya en este segundo screening, con menos accesiones, se injerta la variedad sobre los candidatos.

De nuevo, en esta segunda evaluación las condiciones de cultivo y los parámetros a evaluar son los dos puntos clave, incorporando en esta etapa los síntomas de compatibilidad o incompatibilidad. Los casos más graves de incompatibilidad son muy fáciles de detectar porque las plantas morirán en un corto periodo de tiempo, pero a veces la incompatibilidad se manifiesta con el enanismo de las plantas en un ciclo avanzado. En estos casos es importante conocer las características de la variedad para poder descartar los portainjertos incompatibles.

Un método para evaluar la compatibilidad en plantas injertadas es la fluorescencia de imagen de la clorofila (CFI). La CFI consiste en la evaluación de la actividad fotosintética por medio del estudio de la emisión de fluorescencia de la clorofila en células, hojas o plantas completas (Gorbe y Calatayud, 2012). Esta técnica permite visualizar cambios espaciales y temporales en la fluorescencia de la clorofila que reflejan el estado de la actividad fotosintética en la zona de unión del injerto (Calatayud et al., 2013). Si los valores del parámetro de la fluorescencia asociado al rendimiento fotosintético son elevados hay una buena conexión entre los haces vasculares del patrón con la variedad. Se trata de un método rápido, que permite analizar un gran número de plantas en un estadio temprano tras realizar el injerto, y no destructivo, cuya utilidad para determinar la compatibilidad se ha demostrado en pimiento (Calatayud et al., 2013; Penella et al., 2017, Figura 6).

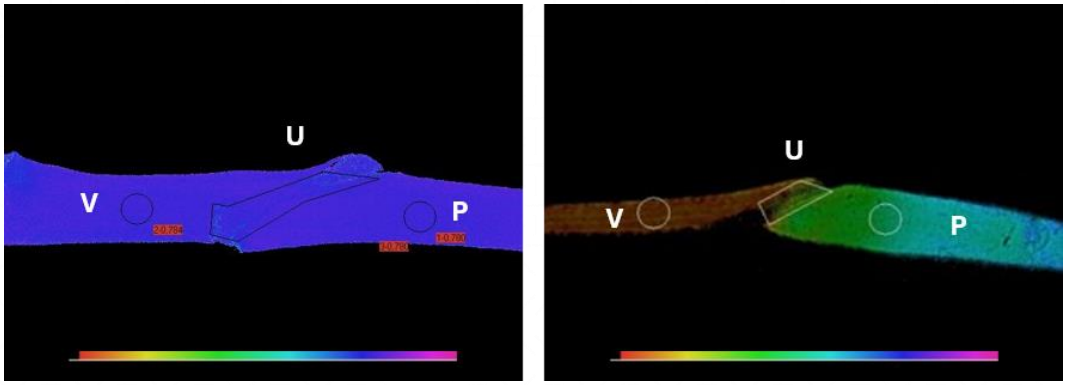


Figura 6. Imágenes de la eficiencia máxima de la actividad fotosintética como fluorescencia de la clorofila en la zona del injerto de dos combinaciones de plantas (izquierda compatible, derecha incompatible). La escala de color representa un valor asociado a la actividad fotosintética máxima desde cero (color negro) a uno (color rosa) en la variedad (V), la zona de unión (U) y el patrón (P). Adaptación de Penella *et al.* (2017)

Finalmente, se seleccionan los portainjertos que permiten a la variedad injertada una mejor adaptación al estrés hídrico que la variedad sin injertar. Esta respuesta superior puede observarse en distintos caracteres como el mantenimiento de la tasa fotosintética, la biomasa

aérea o la altura de las plantas, pero el parámetro clave será un mayor rendimiento. Estos portainjertos pasarán a la siguiente fase.

3.4. Selección de parentales y obtención de híbridos

La obtención de híbridos se basa en el cruzamiento de dos variedades o especies diferentes que tienen distinta constitución genética con el objetivo de potenciar los caracteres deseados de ambos parentales (ANOVE, 2017). Los híbridos F1 o híbridos simples se obtienen del cruce de dos líneas puras y acumulan el mayor vigor híbrido o heterosis, lo que les brinda mejores características agronómicas, de resistencia y productividad (John Porter, n.d.). También se pueden generar híbridos dobles mediante el cruce de dos híbridos simples, o híbridos triples que se obtienen cruzando un híbrido simple con una línea pura (Macrobert et al., 2015).

Para generar híbridos hay que tener en cuenta quién será el donante de polen (padre) y quién será el productor de semilla (madre), para seleccionar de forma adecuada los parentales en relación con la calidad del polen y la capacidad de producir semillas. Por ello se recomienda hacer cruces recíprocos para poder establecer las mejores combinaciones. Es realmente importante que el parental femenino produzca frutos con gran cantidad de semilla híbrida, ya que es uno de los factores clave en el alto coste de la obtención de híbridos F1 (Figura 7).

Figura 7. Frutos de pimiento con un reducido número de semillas (izquierda) y un elevado número de semillas (derecha)

La semilla híbrida presenta un alto coste porque generalmente se realiza polinización manual para asegurar la identidad de los parentales en los cruces, lo que encarece el coste de obtención de semilla. La semilla de híbridos simples es la más costosa pero generalmente también son los híbridos que presentan mayor rendimiento; mientras que los híbridos dobles son los más económicos a nivel de obtención de semilla (parentales híbridos simples con abundante polen y gran producción de semilla) pero también los más variables y con menor rendimiento (Macrobert et al., 2015).

En el programa IVIA-UPV de obtención de portainjertos de pimiento tolerantes a estrés hídrico se cruzaron las accesiones potencialmente tolerantes seleccionadas en la etapa anterior para obtener híbridos, que mostraron mejores resultados que sus parentales (accesiones) en etapas posteriores. Para ello, se emascularon las flores de las accesiones que actúan como parental femenino y se recolectó polen de las accesiones que actúan como parental masculino. Después se polinizaron los parentales femeninos con el polen de los parentales masculinos y se cubrieron las flores para evitar la fecundación con polen no deseado. En esta etapa se ha de prestar

atención a las características de los parentales en cuanto a producción de polen y de semillas, que son clave para determinar la dificultad de obtener la semilla hibrida como se ha comentado anteriormente. Fruto de estos cruces se obtuvo un patrón de pimiento híbrido tolerante a sequía y salinidad que se registró como obtención vegetal con el nombre comercial NIBER®.

3.5. Evaluación de híbridos como portainjertos

Los híbridos obtenidos se ensayan como portainjertos de la variedad de nuevo en condiciones de estrés hídrico evaluando los mismos caracteres que en las etapas anteriores y teniendo en cuenta los síntomas de compatibilidad o incompatibilidad. De nuevo, solo pasarán a la siguiente fase los híbridos en los cuales la variedad muestre un aumento en el rendimiento comercial en condiciones de estrés hídrico, suponiendo una mejora al cultivo respecto a la variedad sin injertar.

Estudio de los mecanismos de tolerancia

Durante la etapa de evaluación de híbridos como portainjertos se realiza simultáneamente el estudio de las respuestas al estrés hídrico asociadas a la tolerancia o sensibilidad. Para ello, se evalúan detalladamente los mecanismos fisiológicos en la variedad injertada y de la parte radicular (portainjerto).

Para determinar la capacidad de resiliencia de las plantas injertadas se caracterizan parámetros fisiológicos relacionados con el estrés hídrico que permitirán generar conocimiento sobre los mecanismos implicados en la tolerancia al estrés hídrico como:

- **Relaciones hídricas:** potencial hídrico, potencial osmótico y contenido relativo de agua.
- Eficiencia fotosintética en hojas: parámetros de intercambio gaseoso, fluorescencia de la clorofila, contenido en clorofilas y carotenos.
- **Estrés oxidativo en hojas:** medida de compuestos antioxidantes (ácido ascórbico, prolina, fenoles, actividad PAL (fenilalanina amonio liasa), peroxidación de lípidos de membrana, actividad de enzimas antioxidantes (catalasa, ascorbato peroxidasa, glutatión peroxidasa, superóxido dismutasa), medida de especies reactivas del oxígeno como peróxido de hidrógeno.
- **Regulación hormonal en hojas y raíces:** cuantificación de hormonas (ácido abscísico, jasmónico, indolacético, citoquininas, giberelinas) así como la señalización mediada por estas hormonas entre patrón y variedad.
- **Regulación de la expresión génica en hojas y raíces:** análisis de secuenciación del RNA para evaluar la expresión diferencial de genes implicados en la respuesta al estrés hídrico y la activación de rutas de señalización asociadas.
- **Metabolitos implicados en hojas y raíces:** a) análisis metabolómico no dirigido (untargeted) para conocer las rutas metabólicas relacionadas con la respuesta a estrés hídrico y la inducción de tolerancia desde el patrón a la variedad; b) análisis metabolómico dirigido para la cuantificación de metabolitos implicados en la respuesta a estrés hídrico, tales como azúcares osmoprotectores (trehalosa, galactinol, rafinosa, estaquiosa), poliaminas (espermina, espermidina, putrescina), glutatión oxidado y reducido, aminoácidos, ácidos orgánicos, etc.

Además, se estudia el efecto del uso de los patrones híbridos sobre la calidad de los frutos de la variedad, en términos morfométricos, organolépticos, perfil aromático y nutracéutico.

3.6. Ensayo en distintas localizaciones con estrés ambiental real

Desde 2012 se han realizado convenios de experimentación con cooperativas como Surinver (Alicante), El Perelló (Valencia), Murgiverde e Indasol (Almería), GALEF (Ibiza) para la validación de los híbridos obtenidos en diferentes condiciones agronómicas y climáticas. Estos convenios demuestran el interés del sector por la obtención de patrones de pimiento tolerantes a los estreses abióticos como el estrés hídrico, y la necesidad de los productores de contar con material vegetal que les permita hacer frente a estas condiciones desfavorables.

Esta evaluación agronómica en múltiples localizaciones permite determinar si los patrones híbridos son capaces de conferir a las variedades mayores rendimientos respecto a las variedades sin injertar en las condiciones de estrés particulares de cada situación geográfica y realizar un estudio de viabilidad económica para conocer si es rentable el uso de estos patrones tolerantes.

Un ejemplo de validación en campo es el patrón híbrido NIBER®, con el que se obtuvieron mayores rendimientos en condiciones de estrés hídrico durante 3 años, en comparación con la variedad sin injertar. En este caso se realizaron ensayos en las fincas experimentales de la cooperativa de ANECOP (norte de Valencia) y la cooperativa Surinver (sur de Alicante), que cuentan con ciclos de producción distintos.

3.7. Registro de la nueva obtención vegetal

Los últimos datos de registro de variedades vegetales en España muestran la importancia del sector de la mejora vegetal, con casi 700 registros de nuevas variedades en 2020 (ANOVE, 2020).

El órgano español designado para el registro de una nueva variedad vegetal es la Subdirección General de Medios de Producción Agrícolas y Oficina Española de Variedades Vegetales, en la que se incluye el Registro de Variedades Comerciales y el Registro de Variedades Protegidas (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación). Los solicitantes han de entregar muestras del material vegetal al registro deseado y en ambos casos las variedades han de someterse a un examen técnico de identificación que, una vez superado en uno de los Registros, se considerará superado en ambos Registros. El examen técnico de identificación determinará si la variedad es distinta, estable y homogénea respecto a las variedades incluidas en la colección de referencia, mediante ensayos en campo y laboratorio.

En el caso del Registro de Variedades Comerciales además se realizan ensayos de valor agronómico o de utilización en los que se evalúa si el material aportado por el solicitante presenta una mejora respecto a las demás variedades incluidas en este Registro. Esta mejora puede estar relacionada con el rendimiento, el uso, el cultivo o los productos derivados de esta variedad. Además, con estos ensayos se comprueba la veracidad de la información aportada por el solicitante respecto al taxón botánico y las características de la variedad, determinando la resistencia a enfermedades o la calidad del producto final, entre otros aspectos. Con esta caracterización se realiza una descripción oficial de la variedad. Una vez superadas las evaluaciones, la nueva variedad se incluye en el Registro nacional y puede comercializarse. Seguidamente, la variedad se recogerá en el Catálogo Común de la Unión Europea, permitiendo su comercialización en la UE y finalmente en el Catálogo de la OCDE.

En el programa IVIA-UPV se registró el portainjerto híbrido de pimiento NIBER® que se encuentra disponible para su comercialización a nivel europeo como patrón de pimiento tolerante a estrés hídrico y salino.

Agradecimientos

Proyecto PID2020-118824RR-C21 financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100011033. Ramón Gisbert-Mullor es beneficiario de una ayuda predoctoral (FPU-MEFP (Spain)). Yaiza G. Padilla es beneficiaria de la ayuda FPI PRE2018-086374 financiada por MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Bibliografía

Aloni, B., Cohen, R., Karni, L., Aktas, H., Edelstein, M. (2010). Hormonal signaling in rootstock–scion interactions. Scientia Horticulturae, 127(2): 119–126. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2010.09.003

Aloni, B., Karni, L., Deventurero, G., Levin, Z., Cohen, R., Katzir, N., Lotan-Pompan, M., Edelstein, M., Aktas, H., Turhan, E., Joel, D. M., Horev, C., Kapulnik, Y. (2008). Physiological and biochemical changes at the rootstock-scion interface in graft combinations between Cucurbita rootstocks and a melon scion. The Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 83(6): 777–783. https://doi.org/10.1080/14620316.2008.11512460

ANOVE. (2020). Aportaciones de la mejora vegetal en España. https://www.anove.es/datos-del-sector/aportaciones-de-la-mejora-vegetal-en-espana/ Acceso: 13 febrero 2024

Bie, Z., Nawaz, M. A., Yuan, H., JungMyung, L., Colla, G. (2017). Introduction to vegetable grafting. En: G. Colla; F. Pérez-Alfocea; D. Schwarz (Eds.), Vegetable grafting: principles and practices (pp. 1–21). CABI Digital Library. https://doi.org/10.1079/9781780648972.0001

Calatayud, Á., San Bautista, A., Pascual, B., Maroto, J. V., López-Galarza, S. (2013). Use of chlorophyll fluorescence imaging as diagnostic technique to predict compatibility in melon graft. Scientia Horticulturae, 149: 13–18. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2012.04.019

Cantero-Navarro, E., Romero-Aranda, R., Fernández-Muñoz, R., Martínez-Andújar, C., Pérez-Alfocea, F., Albacete, A. (2016). Improving agronomic water use efficiency in tomato by rootstock-mediated hormonal regulation of leaf biomass. Plant Science, 251: 90–100. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2016.03.001

Colla, G., Pérez-Alfocea, F., Schwarz, D. (2017). Vegetable grafting: Principles and practices. CABI Digital Library. https://doi.org/10.1079/9781780648972.0000

Cubero, J. I. (2013). Introducción a la mejora genética vegetal. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. ISBN: 8484766551

Davoudi, M., Song, M., Zhang, M., Chen, J., Lou, Q. (2022). Long-distance control of pumpkin rootstock over cucumber scion under drought stress as revealed by transcriptome sequencing and mobile mRNAs identifications. Horticulture Research, 9: uhab033. https://doi.org/10.1093/HR/UHAB033

ANOVE. Etapas, evolución y herramientas de la obtención vegetal (2017). https://www.anove.es/obtencion-vegetal/etapas-evolucion-y-herramientas-de-la-obtencion-vegetal/ Acceso: 13 febrero 2024.

FAO. Climate Change - Land & Water (2024). https://www.fao.org/land-water/overview/climate-change/en/ Acceso: 5 febrero 2024

Foley, J. A., Ramankutty, N., Brauman, K. A., Cassidy, E. S., Gerber, J. S., Johnston, M., Mueller, N. D., O'Connell, C., Ray, D. K., West, P. C., Balzer, C., Bennett, E. M., Carpenter, S. R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockström, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D. P. M. (2011). Solutions for a cultivated planet. Nature, 478(7369): 337–342. https://doi.org/10.1038/nature10452

Folta, K. M. y Klee, H. J. (2016). Sensory sacrifices when we mass-produce mass produce. Horticulture Research, 3: 16032. https://doi.org/10.1038/HORTRES.2016.32/6447912

Gaion, L. A., Braz, L. T., Carvalho, R. F. (2018). Grafting in Vegetable Crops: A Great Technique for Agriculture. International Journal of Vegetable Science, 24(1): 85–102. https://doi.org/10.1080/19315260.2017.1357062

Ghanem, M. E., Hichri, I., Smigocki, A. C., Albacete, A., Fauconnier, M. L., Diatloff, E., Martinez-Andujar, C., Lutts, S., Dodd, I. C., Pérez-Alfocea, F. (2011). Root-targeted biotechnology to mediate hormonal signalling and improve crop stress tolerance. Plant Cell Reports, 30(5): 807–823. https://doi.org/10.1007/S00299-011-1005-2/

Gisbert-Mullor, R., Martín-García, R., Bažon Zidarić, I., Pascual-Seva, N., Pascual, B., Padilla, Y. G., Calatayud, Á., López-Galarza, S. (2023). A Water Stress - Tolerant Pepper Rootstock Improves the Behavior of Pepper Plants under Deficit Irrigation through Root Biomass Distribution and Physiological Adaptation. Horticulturae, 9(3): 362. https://doi.org/10.3390/horticulturae9030362

Goldschmidt, E. E. (2014). Plant grafting: New mechanisms, evolutionary implications. Frontiers in Plant Science, 5: 727. https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00727

Gorbe, E. y Calatayud, A. (2012). Applications of chlorophyll fluorescence imaging technique in horticultural research: A review. Scientia Horticulturae, 138: 24–35. https://doi.org/10.1016/J.SCIENTA.2012.02.002

Hu, H. y Xiong, L. (2014). Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. Annual Review of Plant Biology, 65: 715–741. https://doi.org/10.1146/ANNUREV-ARPLANT-050213-040000

John Porter. (n.d.). Hybrids & Heirlooms. College of Agricultural, Consumer & Environmental Sciences - University of Illinois.

Kumar, K., Gambhir, G., Dass, A., Tripathi, A. K., Singh, A., Jha, A. K., Yadava, P., Choudhary, M., Rakshit, S. (2020). Genetically modified crops: current status and future prospects. Planta, 251(4): 91. https://doi.org/10.1007/S00425-020-03372-8

Kyriacou, M. C., Rouphael, Y., Colla, G., Zrenner, R., Schwarz, D. (2017). Vegetable Grafting: The Implications of a Growing Agronomic Imperative for Vegetable Fruit Quality and Nutritive Value. Frontiers in Plant Science, 8: 741. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00741

Lee, J.-M., Kubota, C., Tsao, S. J., Bie, Z., Echevarria, P. H., Morra, L., Oda, M. (2010). Current status of vegetable grafting: Diffusion, grafting techniques, automation. Scientia Horticulturae, 127(2): 93–105. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.08.003

Liu, S., Li, H., Lv, X., Ahammed, G. J., Xia, X., Zhou, J., Shi, K., Asami, T., Yu, J., Zhou, Y. (2016). Grafting cucumber onto luffa improves drought tolerance by increasing ABA biosynthesis and sensitivity. Scientific Reports, 6(1): 20212. https://doi.org/10.1038/srep20212

López-Marín, J., Gálvez, A., del Amor, F. M., Albacete, A., Fernández, J. A., Egea-Gilabert, C., Pérez-Alfocea, F. (2017). Selecting vegetative/generative/dwarfing rootstocks for improving fruit yield and quality in water stressed sweet peppers. Scientia Horticulturae, 214: 9–17. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.012

López-Serrano, L., Canet-Sanchis, G., Vuletin Selak, G., Penella, C., San Bautista, A., López-Galarza, S., Calatayud, Á. (2019). Pepper Rootstock and Scion Physiological Responses Under Drought Stress. Frontiers in Plant Science, 10: 38. https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00038

Macrobert, J. F., Setimela, P., Gethi, J., Regasa, M. W. (2015). Manual de producción de semilla de maíz híbrido. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. http://hdl.handle.net/10883/16849

Mia, Md. S., Liu, H., Wang, X., Zhang, C., Yan, G. (2020). Root transcriptome profiling of contrasting wheat genotypes provides an insight to their adaptive strategies to water deficit. Scientific Reports, 10(1): 4854. https://doi.org/10.1038/s41598-020-61680-1

Michel, V., Verbeek, F., Pugliese, M. (2015). Success and failures of grafting against soil-borne pathogens. EIP-AGRI, European Commission. COST-Action "Vegetable Grafting to Improve Yield and Fruit Quality under Biotic and Abiotic Stress Conditions". http://www.cost.eu/COST_Actions/fa/Actions/FA1204

Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (n.d.). Registro de variedades. https://www.mapa.gob.es/es/agricultura/temas/medios-de-produccion/semillas-y-plantas-de-vivero/registro-de-variedades/ Acceso: 13 febrero 2024.

Mittler, R. (2006). Abiotic stress, the field environment and stress combination. Trends in Plant Science, 11(1): 15–19. https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.11.002

Padilla, Y. G., Gisbert-Mullor, R., Bueso, E., Zhang, L., Forment, J., Lucini, L., López-Galarza, S., Calatayud, Á. (2023). New insights into short-term water stress tolerance through

transcriptomic and metabolomic analyses on pepper roots. Plant Science, 333: 111731. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111731

Padilla, Y. G., Gisbert-Mullor, R., López-Galarza, S., Albacete, A., Martínez-Melgarejo, P. A., Calatayud, Á. (2023). Short-term water stress responses of grafted pepper plants are associated with changes in the hormonal balance. Frontiers in Plant Science, 14: 1412. https://doi.org/10.3389/FPLS.2023.1170021

Padilla, Y. G., Gisbert-Mullor, R., López-Serrano, L., López-Galarza, S., Calatayud, Á. (2021). Grafting Enhances Pepper Water Stress Tolerance by Improving Photosynthesis and Antioxidant Defense Systems. Antioxidants, 10(4): 576. https://doi.org/10.3390/ANTIOX10040576

Penella, C., Nebauer, S. G., López-Galarza, S., Quiñones, A., San Bautista, A., Calatayud, Á. (2017). Grafting pepper onto tolerant rootstocks: An environmental-friendly technique overcome water and salt stress. Scientia Horticulturae, 226: 33–41. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2017.08.020

Penella, C., Pina, A., San Bautista, A., López-Galarza, S., Calatayud, Á. (2017). Chlorophyll fluorescence imaging can reflect development of vascular connection in grafting union in some Solanaceae species. Photosynthetica, 55(4): 671–678. https://doi.org/10.1007/s11099-017-0690-7

Pina, A., Cookson, S. J., Calatayud, A., Trinchera, A., Errea, P. (2017). Physiological and molecular mechanisms underlying graft compatibility En: G. Colla; F. Pérez-Alfocea; D. Schwarz (Eds.), Vegetable grafting: principles and practices, 132–154. CABI Digital Library. https://doi.org/10.1079/9781780648972.0132

Rivero, R. M., Mittler, R., Blumwald, E., Zandalinas, S. I. (2021). Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. Wiley Online Library, 109(2): 373–389. https://doi.org/10.1111/tpj.15483

Rivero, R. M., Ruiz, J., Romero, L. (2003). Role of grafting in horticultural plants under stress conditions. Journal of Food Agriculture & Environment, 1(1): 70–74. https://doi.org/10.1234/4.2003.318

Rouphael, Y., Cardarelli, M., Colla, G., Rea, E. (2008). Yield, Mineral Composition, Water Relations, and Water Use Efficiency of Grafted Mini-watermelon Plants Under Deficit Irrigation. HortScience, 43(3): 730–736. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.43.3.730

Rouphael, Y., Kyriacou, M. C., Colla, G. (2018). Vegetable Grafting: A Toolbox for Securing Yield Stability under Multiple Stress Conditions. Frontiers in Plant Science, 8: 2255. https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02255

Sae-Tang, W. y Nawata, E. (2019). Effect of water stress on the growth, physiological response and antioxidative gene expression of grafted sweet pepper plants. Agriculture and Natural Resources, 53(6): 581–589. https://doi.org/10.34044/j.anres.2019.53.6.04

Sah, S. K., Reddy, K. R., Li, J. (2016). Abscisic acid and abiotic stress tolerance in crop plants. Frontiers in Plant Science, 7: 571. https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00571

Sánchez-Rodríguez, E., Rubio-Wilhelmi, M. del M., Blasco, B., Leyva, R., Romero, L., Ruiz, J. M. (2012). Antioxidant response resides in the shoot in reciprocal grafts of drought-tolerant and drought-sensitive cultivars in tomato under water stress. Plant Science, 188–189: 89–96. https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.12.019

Schlegel, R. (2007). Concise Encyclopedia of Crop Improvement. Haworth Food & Agricultural Products PressTM. https://doi.org/10.1201/9781482282894

Schwarz, D., Rouphael, Y., Colla, G., Venema, J. H. (2010). Grafting as a tool to improve tolerance of vegetables to abiotic stresses: Thermal stress, water stress and organic pollutants. Scientia Horticulturae, 127(2): 162–171. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2010.09.016

Singh, A., Singh, A., Barb, J., Mahama, A. A. (2023). Genetic Variation and Germplasm Usage. En W. Suza; K. Lamkey (Eds.), Crop Improvement (Chapter 3). Iowa State University Digital Press.

Trinchera, A., Pandozy, G., Rinaldi, S., Crinò, P., Temperini, O., Rea, E. (2013). Graft union formation in artichoke grafting onto wild and cultivated cardoon: an anatomical study. Journal of Plant Physiology, 170(18): 1569–1578. https://doi.org/10.1016/J.JPLPH.2013.06.018

Tsaballa, A., Xanthopoulou, A., Madesis, P., Tsaftaris, A., Nianiou-Obeidat, I. (2021). Vegetable Grafting From a Molecular Point of View: The Involvement of Epigenetics in Rootstock-Scion Interactions. Frontiers in Plant Science, 11: 621999. https://doi.org/10.3389/FPLS.2020.621999/

UNEPMAP (2020). Climate change in the Mediterranean. United Nations Environment Programme. https://www.unep.org/unepmap/resources/factsheets/climate-change Acceso: 5 febrero 2024

Wang, W., Vinocur, B., Altman, A. (2003). Plant responses to drought, salinity and extreme temperatures: Towards genetic engineering for stress tolerance. Planta, 218(1): 1–14. https://doi.org/10.1007/s00425-003-1105-5

Wulf, K. E., Reid, J. B., Foo, E. (2019). Auxin transport and stem vascular reconnection – has our thinking become canalized? Annals of Botany, 123(3): 429–439. https://doi.org/10.1093/AOB/MCY180

Yang, L., Xia, L., Zeng, Y., Han, Q., Zhang, S. (2022). Grafting enhances plants drought resistance: Current understanding, mechanisms, and future perspectives. Frontiers in Plant Science, 13: 1015317. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1015317

Zhang, Z., Cao, B., Gao, S., Xu, K. (2019). Grafting improves tomato drought tolerance through enhancing photosynthetic capacity and reducing ROS accumulation. Protoplasma, 256(4): 1013–1024. https://doi.org/10.1007/s00709-019-01357-3

Zhang, Z., Liu, Y., Cao, B., Chen, Z., Xu, K. (2020). The effectiveness of grafting to improve drought tolerance in tomato. Plant Growth Regulation, 91(1): 157–167. https://doi.org/10.1007/s10725-020-00596-2

INNOVAR
para combatir
LA SEQUÍA

Agri-OsmoZ®
Juntos por un futuro fértil y sostenible

50% de AHORRO en agua de riego

Retenedor de agua

Mineral

100% Natural

KEPWATER ENGINEERING

TÜVNORD INTEGRA

AB AGRICULTURE BIOLOGIQUE

contact@kepwater.com

4.5. Portainjertos de *Prunus* spp. y otras especies adaptados a la sequía. Sostenibilidad hídrica mediante la mejora genética

Beatriz Bielsa [1], Ignasi Iglesias [2], María José Rubio-Cabetas [3*]

[1] *Departamento de Ciencia Vegetal, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA)*

[2] *Agromillora Group*

* *mjrubioc@cita-aragon.es*

Índice

1. Portainjertos de *Prunus*: ciruelos e híbridos de almendro y melocotonero 412

1.1. Caracterización de la respuesta fisiológica al estrés hídrico 415

1.2. Caracterización de la respuesta bioquímica al estrés hídrico 418

1.3. Caracterización de la respuesta molecular al estrés hídrico 420

2. Especies de *Prunus*. Los almendros autoenraizados 425

3. Frutales de pepita 426

3.1. Portainjertos de Manzano adaptados a la sequía. 426

3.2. Portainjertos de peral adaptados a la sequía 428

4. Especies de Cítricos 429

Resumen

El aumento de los periodos de sequía extrema que están teniendo lugar en la cuenca mediterránea, la denominada zona 0 del cambio climático y la más vulnerable del planeta, debido al cambio climático provoca un impacto negativo en la producción de frutales. Este escenario supone un desafío para el programa de mejora de portainjertos de *Prunus* spp. del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), marcándose como uno de sus objetivos el desarrollo de portainjertos adaptados a estas nuevas condiciones climáticas. Para ello se centra en estudiar la adaptación y tolerancia a la sequía en portainjertos híbridos, mediante la caracterización de su respuesta fisiológica, tanto a corto como a largo plazo, así como de determinar el papel del ácido abscísico (ABA) en dicha respuesta y cómo esta fitohormona desencadena la respuesta molecular al estrés hídrico, activando genes implicados en la adaptación a la sequía y relacionados con el uso eficiente del agua. El conocimiento generado de este trabajo no solo contribuye a comprender mejor las estrategias que siguen estos portainjertos frente al estrés hídrico, sino que también permitirá su aplicación en el desarrollo de marcadores moleculares útiles en la selección asistida (SAM) para la obtención de nuevos patrones con un mayor uso eficiente del agua (UEA) tan demandados por los nuevos sistemas de producción que buscan una mayor sostenibilidad. Se exponen en el presente

artículo los principales aspectos referidos al comportamiento de patrones pertenecientes a diferentes especies, referidos a su comportamiento en condiciones de estrés hídrico y cuáles son las perspectivas de futuro.

1. Portainjertos de *Prunus*: ciruelos e híbridos de almendro y melocotonero

En la actualidad, el cambio climático genera un impacto negativo en la agricultura al aumentar la frecuencia de los periodos de sequía extrema (IPCC, 2023) y provocar cambios en los climas regionales, como ocurre en la cuenca mediterránea, donde la escasez de agua se ve cada vez más agravada (Tejedor *et al.,* 2016). Así, la sequía es uno de los principales estreses abióticos con un gran impacto ecológico y socioeconómico en España para los frutales de hueso, en particular de secano, perjudicando el crecimiento y el rendimiento de estos cultivos. Realizando una visión retrospectiva se deduce que, para las especies frutales cultivadas en regadío, la selección de patrones por su tolerancia a la sequía no ha constituido un objetivo prioritario en la mayoría de países por el hecho de cultivarse en regadío. Al contrario, para los frutales de secano cultivados en el área mediterránea, en particular el almendro, éste si ha sido un objetivo de la selección de nuevos patrones: la tolerancia a la sequía. Es por ello, que el desarrollo de portainjertos adaptados a las nuevas condiciones edafoclimáticas derivadas del cambio climático está siendo un reto necesario en los programas de mejora. Existe una necesidad urgente de identificar patrones adaptados a la sequía, que permitan un uso eficiente del agua y así, una gestión más sostenible del sistema productivo.

Existen modelos teóricos de predicción de clima (temperatura, precipitación, evapotranspiración, etc.) desarrollados por el IPCC, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Se trata de cinco escalas diferentes desde el más débil SSSP 1 al más severo SSSP 5 teniendo en cuenta la evidencia científica. Estos modelos han tomado datos recopilados de diferentes estudios científicos que analizan los diferentes parámetros mencionados y su evolución en los últimos años.

La mayoría de estos estudios constatan el aumento de las temperaturas, la disminución de horas frío invernal y el descenso de las precipitaciones (Fraga *et al.* 2023) (Figura 1), en particular en el área mediterránea. Estos registros constatan a lo largo del tiempo periodos de sequía ligados a periodos de hambrunas desde que existen registros (Fergus-Rey *et al.* 2023). La sequía es un tema complejo y un fenómeno en el que intervienen diferentes factores y que se manifiesta de diversas formas. El más importante es quizá la evidencia del registro de las temperaturas y por ello, aunque el régimen de lluvia ha cambiado, lo importante es el efecto de las temperaturas y por ello se puede hablar de Sequia Meteorológica que se obtiene a través de dos índices climáticos.

El Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) que se obtiene con datos de precipitación y el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizado (SPEI), que utiliza datos de precipitación y demanda de agua por parte de la atmósfera. Se aporta la información que permite identificar la anomalía climática considerando periodos previos más o menos largos y que informan de la posible severidad de diferentes tipos de sequía meteorológica. Además de ello, se muestra la duración la sequía meteorológica desde el inicio de la misma (considerando

un umbral de condiciones secas) y su magnitud acumulada. El monitor permite la visualización del histórico desde 1961 y la selección de un punto concreto, del que se puede visualizar y descargar la serie del índice de sequía meteorológica (Figura 1).

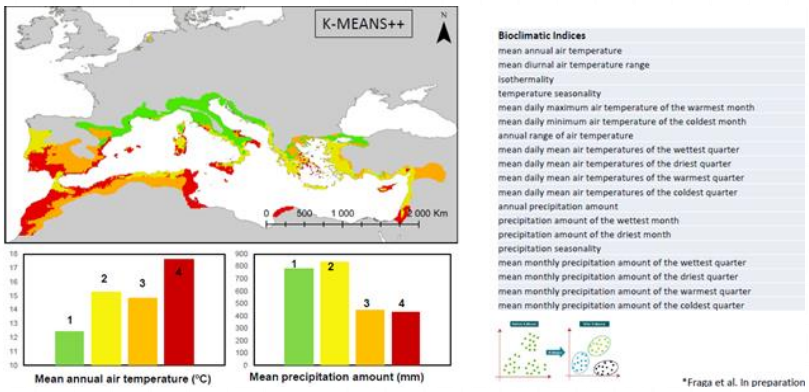


Figura 1. Índices bioclimáticos donde se observa el aumento de la temperatura anual del aire (°C) y el descenso de la precipitación media (mm) en diferentes regiones y registros de la Cuenca mediterránea

SPEI: Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada. Muestra la severidad de la sequía meteorológica teniendo en cuenta la Precipitación y la Demanda de agua por parte de la atmósfera. Cuanto más negativo es el valor, más severa es la sequía meteorológica (Fergus-Rey *et al*. 2023) (Figura 2). Los efectos del aumento de temperatura y de precipitación será más acentuada en los países de clima mediterráneo que del clima atlántico (Fraga *et al.,* 2023).

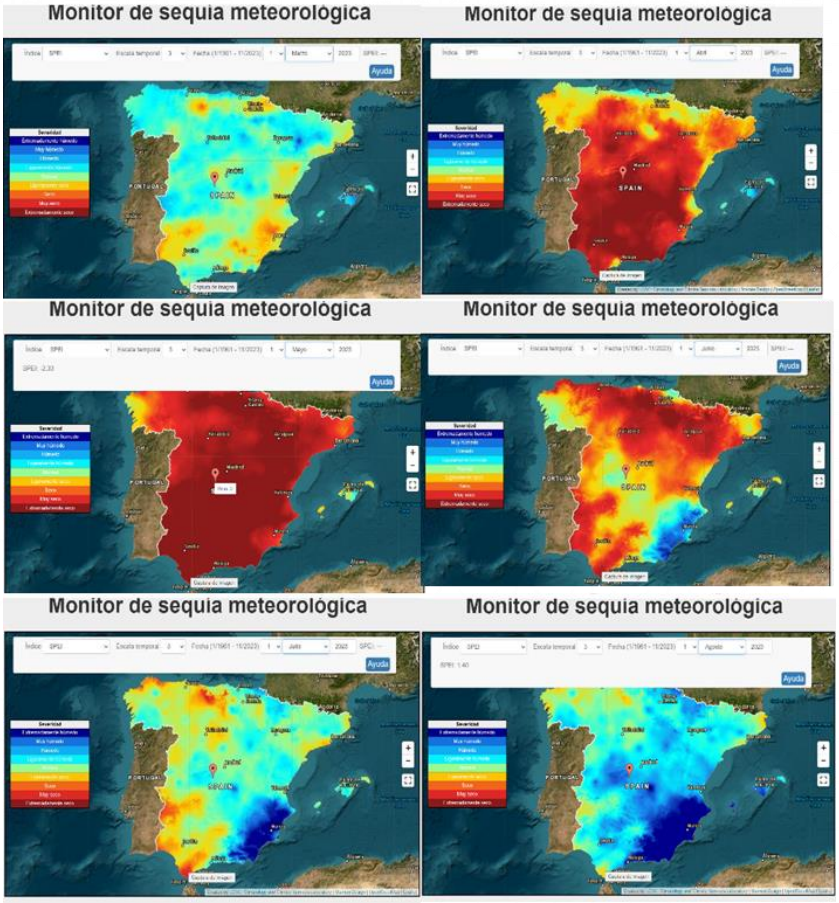


Figura 2. Monitor de sequía meteorológica de los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio y agosto de 2023. Estos datos explicarían el menor tamaño del fruto de la almendra y la disminución de cosecha de la misma

Desde el programa de mejora genética de portainjertos *Prunus* spp. del Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), se ha centrado en los cultivos mediterráneos de mayor importancia económica del género *Prunus*. Especialmente se han estudiado el melocotonero y almendro, aunque sin olvidar ciruelos y el cerezo en menor medida por la distinta genética de los mismos. Dentro de nuestro programa se ha hecho énfasis durante los últimos años el estudio en profundidad de la respuesta adaptativa y de tolerancia a la sequía en portainjertos híbridos interespecíficos almendro × melocotonero y selecciones derivadas de cruzamientos de estos híbridos con genotipos de ciruelo para incorporar un mayor número de tolerancias abióticas, así como de resistencias a enfermedades, ofreciendo nuevas oportunidades en los programas de mejora de *Prunus* y distintas escalas de vigor (Rubio-Cabetas *et al*., 2017). En general los híbridos almendro x melocotonero son más tolerantes a la sequía, carácter que le viene dado por el almendro, que los ciruelos diploides y hexaploides (Figura 3). Los ciruelos se consideran plantas derrochadoras que utilizan toda el agua para seguir creciendo, mientras que no profundizan ni desarrollan más tejido radicular, al contrario de los híbridos almendro x melocotonero que son plantas ahorradoras, cierran estomas, cesan el crecimiento mientras siguen explorando y desarrollando tejido de raíces (Figura 4).

Figura 3. Experimento de sequía de dos portainjetos de *Prunus* sometidos a sequia durante 10 días en invernadero. A: Mariana 2624 (*P. munsuniana* x *P. besey*)-Ciruelo diploide-color rojo) B: Hansen 1 (hibrido de almendro x melocotonero)- Verde

Figura 4. Experimento de sequía de dos portainjetos de *Prunus* sometidos a sequia durante 10 días en invernadero. A: Mariana 2624 (*P. munsuniana* x *P. besey*)-Ciruelo diploide-color rojo) B: Hansen 536 (hibrido de almendro x melocotonero)- Verde

Estos estudios comparando ciruelos e híbridos almendro x melocotonero de distinta procedencia han posibilitado la identificación de genes relacionados con el uso eficiente del agua (UEA) y su caracterización mediante tres enfoques diferentes: fisiológico, bioquímico y molecular cuyos resultados más relevantes se detallan a continuación.

1.1. Caracterización de la respuesta fisiológica al estrés hídrico

En las plantas, la reducción de la disponibilidad de agua produce un descenso de la conductividad hidráulica en las raíces que prepara a la planta para las condiciones de déficit hídrico, aumentando la resistencia al flujo de agua y, por tanto, reduciendo las pérdidas por evaporación (Chaves *et al*., 2009). Bajo el estrés provocado por la sequía, las plantas desencadenan diferentes mecanismos de respuesta asociados a la regulación de distintos procesos fisiológicos y bioquímicos, afectando a la morfología de la planta. Mediante la regulación del cierre estomático y un ajuste osmótico, se produce una disminución de la expansión foliar y de la actividad fotosintética, regulando el crecimiento para minimizar la pérdida de agua (Belin *et al*., 2010; Lind *et al.,* 2015; Verslues *et al.,* 2006). Esta respuesta fisiológica ha sido estudiada a través de numerosos parámetros, incluyendo la conductancia estomática (gs), el potencial hídrico de la hoja (LWP), el contenido relativo en agua foliar (RWC),

y la estabilidad de la membrana citoplasmática (CMS) y sus relaciones, aportando una visión amplia de la capacidad para tolerar el estrés provocado por la sequía en las plantas (Verslues *et al.*, 2006).

Para comprender los mecanismos fisiológicos implicados en el estrés hídrico a largo y corto plazo en distintos genotipos de híbridos interespecíficos, se desarrollaron diferentes ensayos de sequía donde se monitorizaron parámetros fisiológicos relacionados con el uso eficiente del agua (UEA) como son el potencial hídrico foliar (LWP), el intercambio gaseoso, el contenido relativo de agua (RWC) y la estabilidad de la membrana citoplasmática mediante el estudio de la fuga de electrolitos (EL). En un ensayo a largo plazo (15 días sin riego, seguidos de 15 días de restauración del riego), se comprobó como el híbrido almendro × melocotonero [*P. amygdalus* Batsch. × *P. persica* (L.) Batsch.] Garnem® se comporta como una planta derrochadora durante los primeros días de estrés (10 días), consumiendo rápidamente sus reservas hídricas para mantener la tasa de crecimiento; transformándose en planta ahorradora cuando el estrés es más severo (15 días) y así, controlar a bajos potenciales, la pérdida de conductividad hidráulica (Fig. 4), a diferencia de los otros dos genotipos híbridos interespecíficos como son Mirobolán 'P.2175' × Garnem®-3 (*P. cerasifera* Ehrh. × 'Garnem') y el híbrido OP-'P.2175' (*P. cerasifera* Ehrh.) analizados. Sin embargo, la estrategia adoptada por estos dos genotipos fue de plantas ahorradoras desde el primer momento (Figura 5). La recuperación de los valores de LWP y conductividad estomática, además del rebrote foliar durante el periodo de recuperación de 15 días, sugirió que los tres genotipos presentaban un rápido restablecimiento de sus funciones homeostáticas (Figura 5) (Bielsa *et al*., 2016).

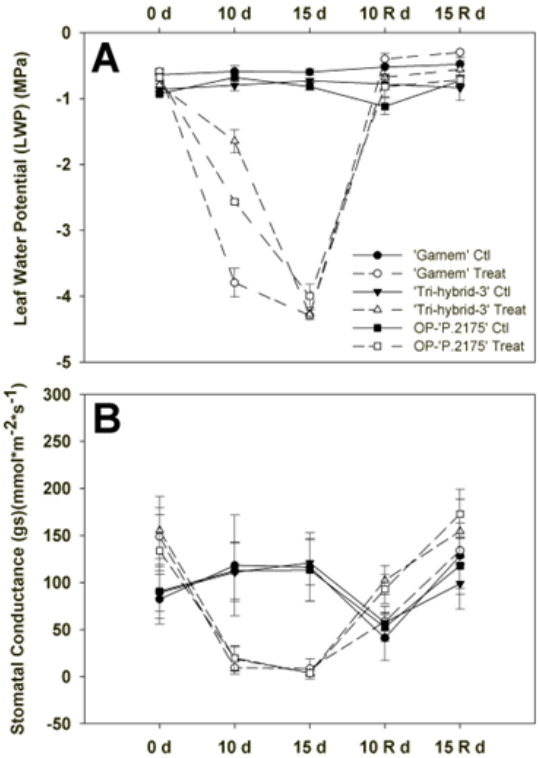


Figura 5. Valores de (A) potencial hídrico foliar (LWP) y (B) conductancia estomática (gs) en plantas control y plantas estresadas de los genotipos Garnem®, Mirobolán 'P.2175' × Garnem®-3 y OP-'P.2175' durante un experimento de sequía a largo plazo. Las barras de error representan el error estándar de la media. (d: días; R: recuperación)

A corto plazo se llevaron a cabo dos experimentos: (i) el primero en el que las raíces de las plantas de Garnem® estresadas fueron introducidas en membranas de diálisis con su sustrato de turba y se sumergieron en una solución de polietilenglicol, PEG-6000, para simular condiciones de estrés hídrico durante 24 h (Bielsa *et al*., 2018b); (ii) y otro experimento en el que a plantas de Garnem® con sustrato de perlita se les restringió el riego durante 24 h, con un posterior periodo de restablecimiento de riego de 24 h (Bielsa *et al*., 2019b). Los mecanismos de evitación, explicados anteriormente, presentes en Garnem® fueron confirmados en ambos experimentos. La tasa de RWC en las plantas estresadas disminuyó, pero aún mantenía valores altos, mientras que el %EL fue incluso menor a las 24 h en ambos ensayos. Es decir, Garnem®, a bajos potenciales hídricos, es capaz de mantener altos sus valores de RWC y baja su tasa de EL, lo cual confirma ese ajuste osmótico, evidenciando un mecanismo de tolerancia a la sequía por parte de Garnem® (Bielsa *et al*., 2018b; Bielsa *et al.,* 2019b).

Cuando estos experimentos se realizan a corto plazo con el Hibrido Garnem® y un ciruelo *P. cerasifera* se observan igualmente la rápida recuperación del hibrido Garnem frente al ciruelo cerasifera que sigue disminuyendo a las 24 horas del estrés hídrico (Figura 6 y 7) (Bielsa *et al*., 2021).

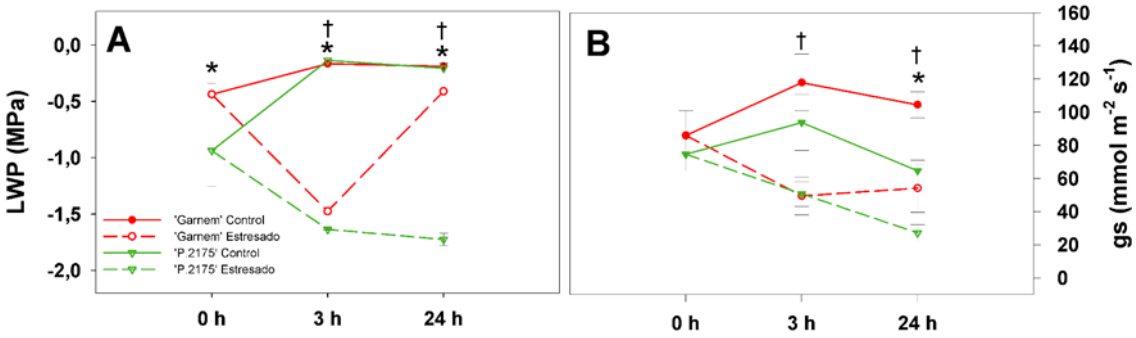


Figura 6. Valores de (A) potencial hídrico foliar (LWP), (B) conductancia estomática (gs), durante un experimento a corto plazo (24 h) en plantas control y plantas sometidas a estrés de Garnem® y P. 2175 (*P. Cerasifera*). Representa diferencias significativas (p ≥ 0,05) entre tratamientos (control y estresado) * Representa diferencias significativas (p ≤ 0.05) entre genotipos ('Garnem' y 'Mirobolán P.2175')

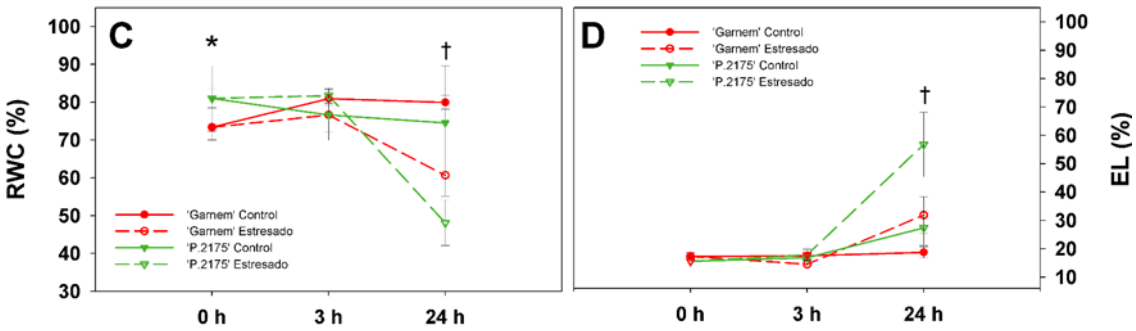


Figura 7. Valores (C) contenido relativo en agua (RWC) y (D) fuga de electrolitos (EL) durante un experimento a corto plazo (24 h de estrés) en plantas control y plantas sometidas a estrés de Garnem® y P. 2175 (*P. cerasifera*) teniendo como sustrato perlita. * Representa diferencias significativas (p ≤ 0.05) entre genotipos ('Garnem' y 'Mirobolán P.2175') † Representa diferencias significativas (p ≥ 0,05) entre tratamientos (control y estresado

1.2. Caracterización de la respuesta bioquímica al estrés hídrico

La ruta de señalización del ácido abscísico (ABA) es una de las vías más importantes que regula el cierre estomático (Kim *et al*., 2010) e induce la expresión de diversos genes de respuesta a la sequía con funciones protectoras (Takahashi *et al*., 2018). Esta fitohormona se acumula en primer lugar en las raíces expuestas al estrés por hídrico. Luego, el ABA actúa como una molécula de señalización de la raíz al brote, transportando la señal de estrés a las hojas y promoviendo así el cierre estomático (Christmann *et al*., 2013).

Para determinar la inducción bioquímica provocada por el ácido abscísico (ABA) y dilucidar su implicación en la respuesta al estrés hídrico, además de su participación en el desencadenamiento de los mecanismos fisiológicos y moleculares, se realizó el cálculo del contenido de ABA en el experimento a corto plazo en el que se sometieron plantas de Garnem® con sustrato de perlita a estrés hídrico durante 24 h, seguidos de 24 h de recuperación del suministro hídrico. Se observó un crecimiento exponencial del contenido de ABA desde las 0 h hasta las 24 h en las plantas estresadas, disminuyendo a valores iniciales a las 24 h de recuperación del estado hídrico (Figura 8). Igualmente se observó el aumento de la hormona IBA en las plantas estresadas de Garnem® pero en menor medida que en las plantas estresadas del ciruelo Mirabolano (Figura 9). El ABA es una de las fitohormonas de respuesta a estrés hídrico más importante ya que su acumulación está relacionada con diferentes rutas de señalización cruciales como la regulación del cierre estomático, el ajuste osmótico, la estabilidad de la membrana e incluso está implicada en regulaciones del crecimiento radicular. Procesos que mejoran el UEA. Por tanto, Garnem® volvería a presentar un claro mecanismo de tolerancia que le lleva a la adaptación bajo condiciones de sequía (Bielsa *et al*., 2019b, Bielsa *et al*., 2021).

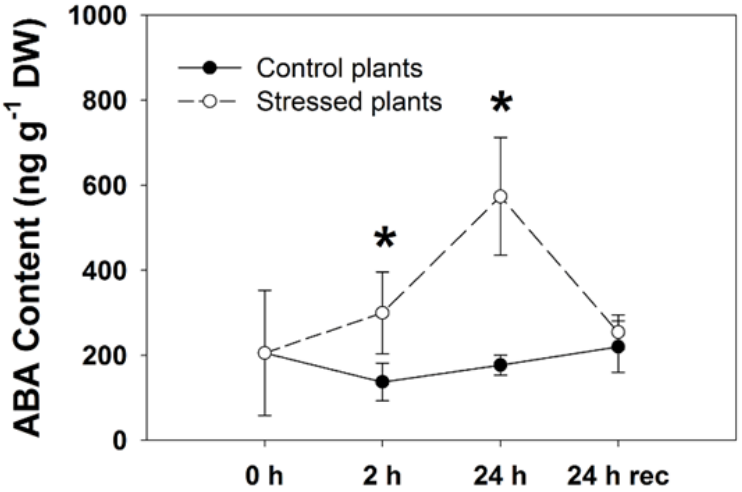


Figura 8. Contenido foliar de ácido abscísico (ABA) en plantas control y estresadas de Garnem® en un ensayo a corto plazo con sustrato de perlita. Las barras de error representan el error estándar de la media. Los asteriscos representan diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre tratamientos (control – estresado) para cada punto temporal del ensayo. (H: horas; rec: recuperación)

Con el fin de completar los ensayos realizados en condiciones controladas, se llevó a cabo un experimento de sequía en campo, en una de las regiones más áridas de España como es Murcia. Árboles en producción de las variedades de melocotonero 'Fergold' y 'UFO-3' injertadas en Garnem® fueron sometidos a 5 días sin riego, con 5 días de recuperación de riego en dos años, 2015 y 2016. En cuanto a su respuesta fisiológica, el LWP indicó estrés en los árboles, con valores

de LWP cercanos a -2 MPa (Figura 10). A través de sondas se midió el contenido hídrico del suelo (SWC) y se observó cómo descendía en ambas variedades, pero este descenso del contenido de agua fue más acusado en 'Fergold' que en 'UFO-3' (Figura 11). Este hecho puede ser debido a que la cosecha de los frutos no se hizo en el mismo día. En 'UFO-3', los frutos se recogieron antes, entrando en parada vegetativa antes y por tanto con menos necesidades de agua que 'Fergold' que hacía menos tiempo que se había cosechado el fruto. Las tasas de intercambio gaseoso estudiadas variaron entre los árboles control y los estresados, pero no se observaron diferencias genotípicas en los árboles estresados. En cuanto al RWC, este se mantuvo alto durante todo el ensayo.

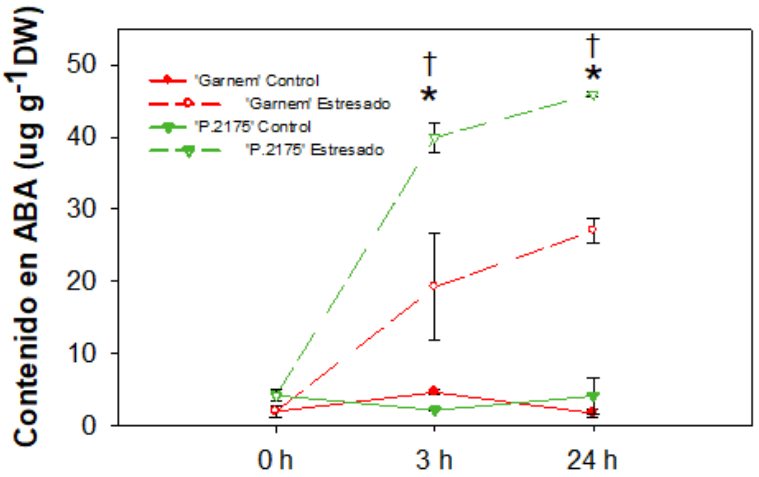


Figura 9. Contenido foliar de ácido abscísico (ABA) en plantas control y estresadas de Garnem® y Ciruelo Mirabolano en un ensayo a corto plazo de 24 horas con sustrato de perlita. * Representa diferencias significativas ($p \leq 0.05$) entre genotipos ('Garnem' y 'Mirobolán P.2175') † Representa diferencias significativas ($p \geq 0,05$) entre tratamientos (control y estresado)

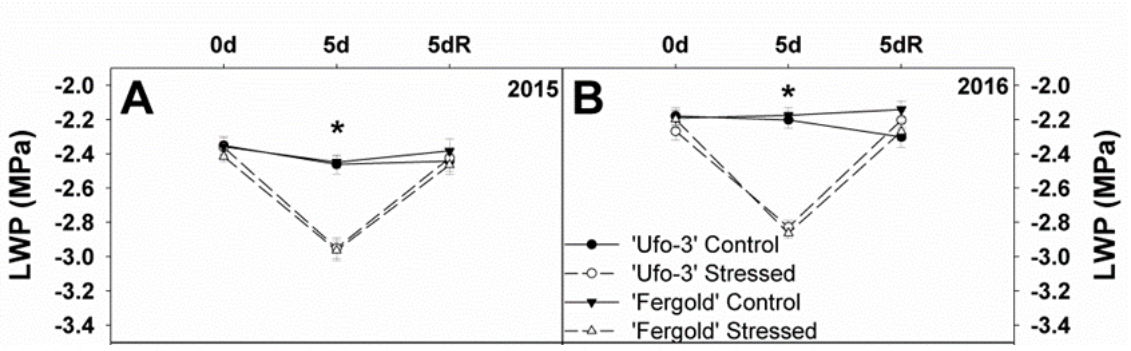


Figura 10. LWP en dos melocotoneros estresados en zona árida

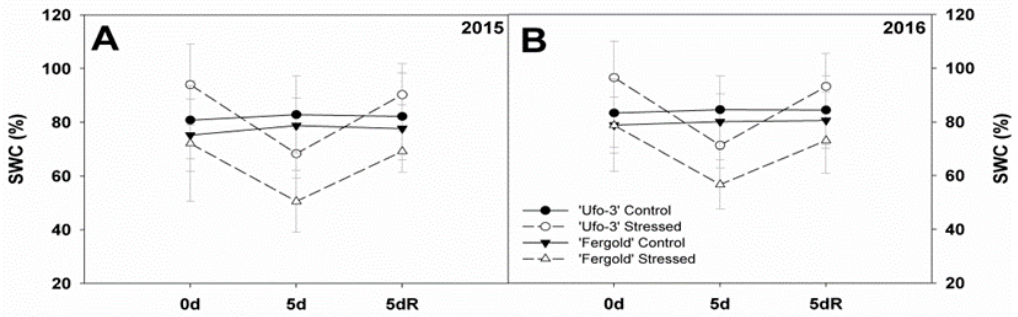


Figura 11. SWC en dos melocotoneros estresados en zona árida

Teniendo en cuenta todo esto, se puede decir que las dos variedades injertadas sobre Garnem® fueron capaces de mantener su contenido hídrico, a pesar de los bajos potenciales, presentando esa estrategia de evitación ya mencionada. A nivel bioquímico, se comprobó que la variación en el contenido de ABA no siguió la misma tendencia que en el experimento realizado en condiciones controladas (Figura 12). En condiciones de campo, la respuesta fisiológica no fue debida a los mecanismos de señalización provocados por el contenido de ABA como se había comprobado en el ensayo con condiciones controladas. La falta de correlación entre la respuesta bioquímica y fisiológica, en este ensayo, sugirió que bajo condiciones de campo los cambios fisiológicos permiten la evitación al estrés. Mientras que el mecanismo de señalización del ABA desde la raíz hasta las hojas necesitaría un nivel de estrés más severo que el experimentado durante estos 5 días en estas condiciones edafoclimáticas áridas (Bielsa et al., 2019b; Bielsa *et al*., 2019a).

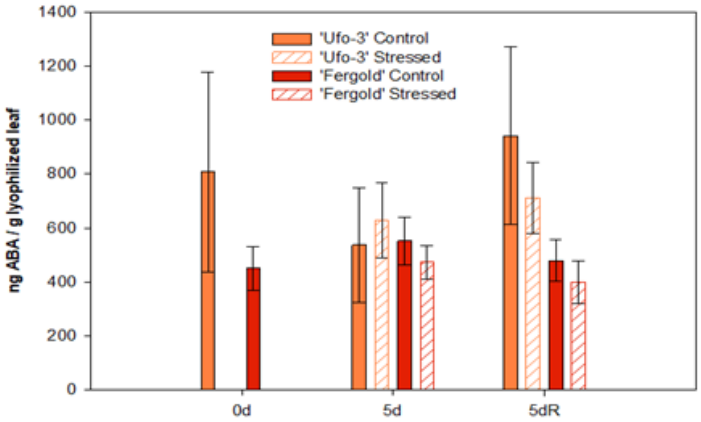


Figura 12. Contenido foliar de ácido abscísico (ABA) en melocotoneros sometidos a estrés hídrico.

1.3. Caracterización de la respuesta molecular al estrés hídrico

El mecanismo de señalización del ABA desencadena una cascada de procesos moleculares que permiten el mantenimiento de la homeostasis celular, conduciendo a la adaptación de la planta a la sequía (Takahashi *et al*., 2018). Estos procesos están involucrados genes reguladores como son factores de transcripción (FTs), quinasas y fosfatasas, y enzimas para la biosíntesis de fitohormonas; y genes efectores que incluyen chaperonas, proteínas abundantes de embriogénesis tardía (LEA), enzimas implicadas en la biosíntesis de osmolitos, y proteínas canalizadoras de agua (Takahashi *et al.,* 2018).

Con el fin de caracterizar ese mecanismo de señalización, se evaluó la respuesta genética a niveles transcriptómico (a largo y corto plazo) y proteómico (a corto plazo) para identificar genes candidatos involucrados en la respuesta a la sequía y caracterizar fuentes naturales de tolerancia a la sequía. Para ello, se analizó la expresión génica de dos genes reguladores: el gen que codifica para una proteína con dominio de zinc A20/AN1 dedo de zinc (ppa012373m) relacionado con las respuesta a bajas temperaturas, salinidad y sequía, y un factor de transcripción (TF) bZIP (ppa013046m), homólogo al gen BZIP3, que actúa como regulador postranscripcional del gen ProDH, involucrado a su vez en el metabolismo de la prolina; y dos genes efectores: el gen Dhn1 (ppa005514m) y el gen que codifica para una proteína LEA homóloga a LEA D29 (ppa008651m) en tejidos de floema y raíz procedentes de los tres genotipos (Garnem®, 'P.2175' × Garnem®-3

y OP-'P.2175') estudiados en el ensayo a largo plazo (15 días sin agua, seguidos de 15 días recuperación del riego). La expresión relativa de los dos genes efectores fue mayor en raíz que en floema (Figura 13), indicando que la respuesta primaria se realiza antes en el sistema radicular. El máximo nivel de expresión se alcanzó a los 15 días, siendo mayor en los genotipos Garnem®-3 y OP-'P.2175', que en Garnem® (Bielsa *et al*., 2016). La expresión génica relativa de los dos genes efectores presentó una tendencia similar a la observada en los FTs. El mayor nivel de expresión fue caracterizado en raíz a los 15 días y fue superior en los genotipos Garnem®-3 y OP-'P.2175' que en Garnem®. Por otro lado, la alta expresión relativa presente en el gen codificante de la proteína LEA revelaría un papel osmoprotector bajo condiciones de sequía (Bielsa *et al.,* 2016).

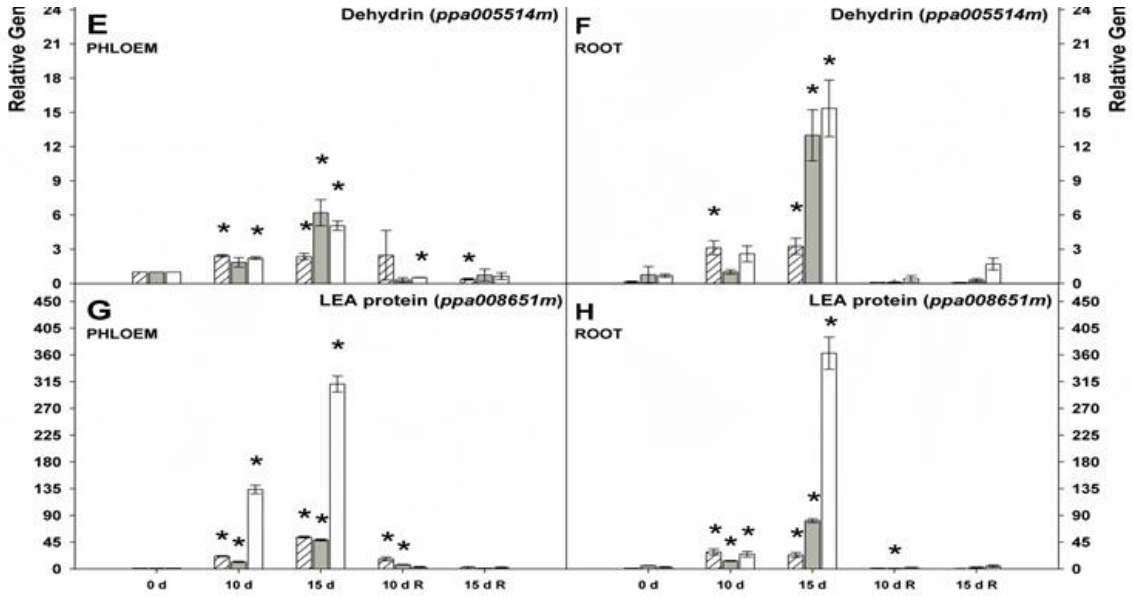


Figura 13. Expresión de genes efectores de la sequía en la raíz y el floema de Garnem.

A corto plazo, se realizó un análisis del transcriptoma (RNA-seq) de tejido radicular en Garnem® tomado a las 0 h, 2 h y 24 h, procedente del ensayo con PEG-6000. Mediante la secuenciación con tecnología Illumina se obtuvieron 10 bibliotecas con un total de 0,4 billones de lecturas brutas. Tras un filtrado y ensamblaje de novo, se obtuvieron 147.742 contigs, que se normalizaron mediante el método RPKM, calculando la expresión diferencial con el dato de corte log5. Así se obtuvieron un total de 83.110 DECs (Differential Expression Contig). Finalmente, se llegaron a anotar funcionalmente 26.700 DEGs (Diffenential Expression Genes - Genes Diferencialmente Expresados), de entre los cuales se identificaron 655 enzimas participantes en 140 rutas metabólicas que se desencadenan en la respuesta a estrés hídrico. Estas son, entre otras, el metabolismo de la purina, tiamina, el almidón y la sacarosa, y la ruta de la glicólisis. Así pues, se identificaron genes involucrados en las cascadas de señalización y control transcripcional, genes osmoprotectores y los genes implicados en el transporte de agua e iones (Bielsa *et al*., 2018b).

Cuando se ha estudiado la expresión diferencial de los genes identificados como responsables a la sequía, siempre se ha observado una expresión diferencial entre el hibrido de almendro x melocotonero Garnem® y el ciruelo Mirobolan P.2175). La respuesta y adaptación a la sequía se desencadena en tres procesos con distintos genes implicados en cada uno de ellos:

1. Percepción y propagación de la señal Gen ACA4 y Ca2+-ATPase-like (Figura 14)
2. Traducción de la señal Gen Myb25 TF, Gen WRKY53 TF (Figura 15)
3. Expresión génica hacia la adaptación a la sequía. Gen uspA-like Gen LEA-D-34-likeE (Figura 16) (Bielsa *et al*., 2021).

El análisis proteómico realizado en raíces de Garnem® procedentes del experimento de sequía a corto plazo (24 h sin riego, seguidas de 24 h de recuperación) con plantas en sustrato de perlita, reveló cambios significativos en los niveles de abundancia de una serie de proteínas a las 24 h de estrés hídrico. De estas, 15 proteínas fueron identificadas en diferentes procesos biológicos, descritos también en el análisis transcriptómico descrito anteriormente como son el metabolismo lipídico, el metabolismo de amino ácidos y nitrógeno, en procesos de actividad del transporte de iones, el metabolismo del carbono, en procesos de modificación y síntesis de proteínas, en la respuesta transcripcional, la respuesta defensiva y en la hormonal, además de otras proteínas relacionadas con los procesos de edición del ARN y por tanto con la inducción de genes de respuesta a sequía (Bielsa *et al*., 2019b).

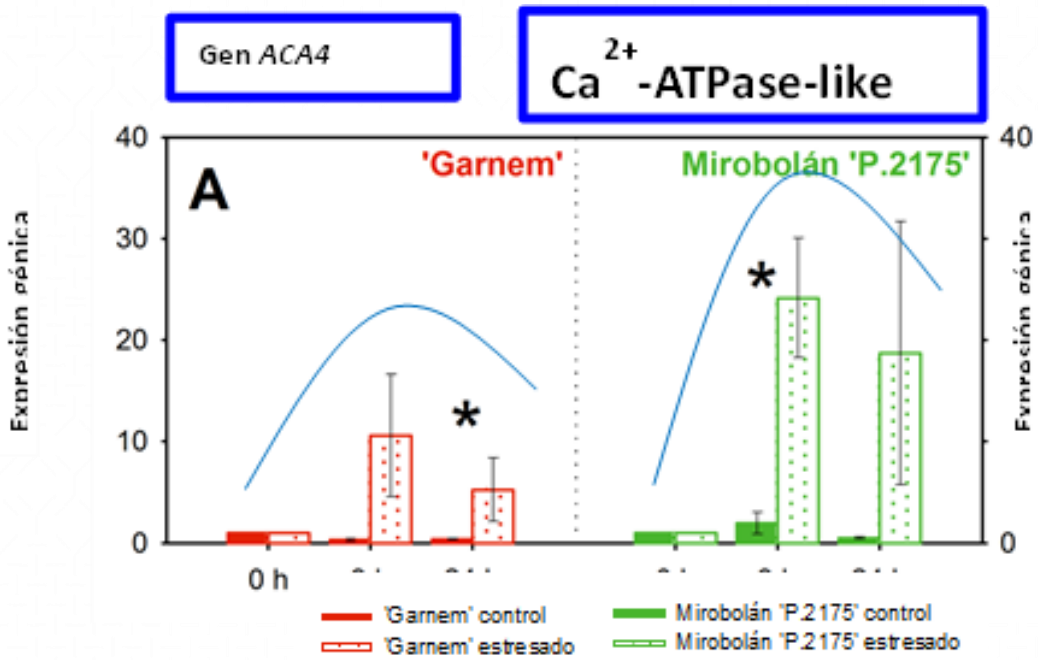


Figura 14. Expresión de genes responsables de Percepción y propagación de la señal en Garnem y Mirobolan

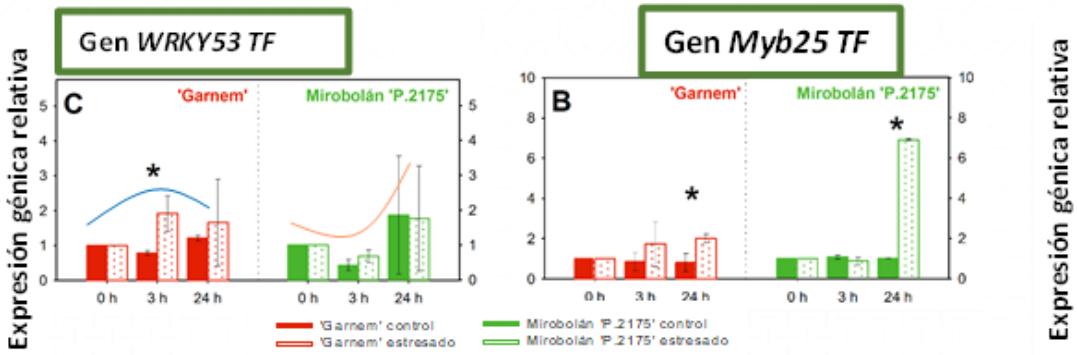


Figura 15. Expresión de genes responsables de Traducción de la señal en Garnem y Mirobolan

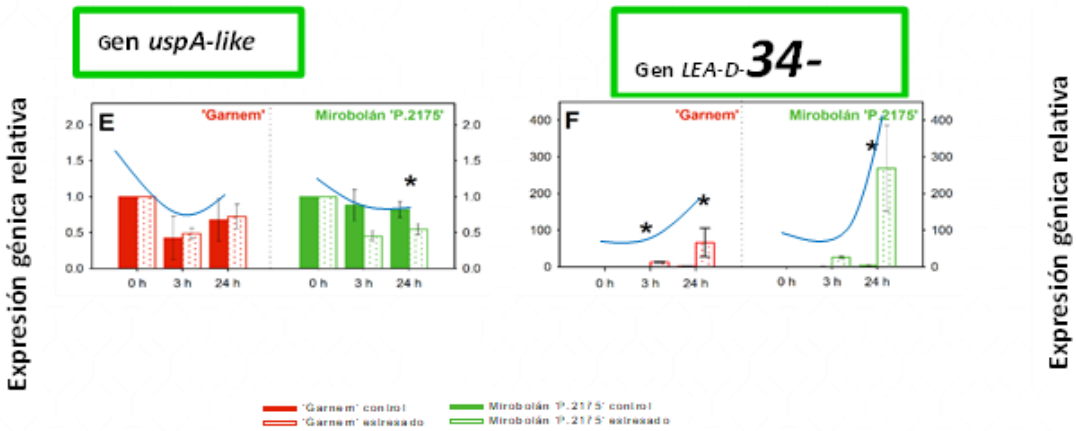


Figura 16. Expresión de genes responsables hacia la adaptación a la sequía Traducción de la señal en Garnem y Mirobolan

Parental Genotypes			No. individuals
P. davidiana (Carr.) Franch			3
P. mira Koehne kov et. kpst			2
P. persica (L.) Batsch			1
'Garfi' (*P. amygdalus* (L.) Batsch)			1
'Nemared' (*P. persica* (L.) Batsch)			1
Wild Species			
P. bucharica (Korsh.) Fetdsch.			5
P. zabulica Seraf.			5
P. webbii (Spach) Vieh.			5
P. vavilovi (Spach)			4
P. orientalis (Mill.) [syn. *P. argentia* (Lam)]			4
P. gorki (Fristch)			4
P. kotschii (*A. kotschii* Boiss.)			4
Hybrid Genotypes	♀	♂	
'Mira×Pecher'	*P. mira* Koehne kov et. kpst	*P. persica* (L.) Batsch	1
'Barrier'	*P. davidiana* (Carr.) Franch	*P. persica* (L.) Batsch	1
'Cadaman'	*P. persica* (L.) Batsch	*P. davidiana* (Carr.) Franch	1
'GF-677'	Garfi' (*P. amygdalus* (L.) Batsch)	*P. persica* (L.) Batsch	1
'Garnem'	Garfi' (*P. amygdalus* (L.) Batsch)	Nemared' (*P. persica* (L.) Batsch)	1
'Felinem'	Garfi' (*P. amygdalus* (L.) Batsch)	Nemared' (*P. persica* (L.) Batsch)	1
'Monegro'	Garfi' (*P. amygdalus* (L.) Batsch)	Nemared' (*P. persica* (L.) Batsch)	1
'GN-8'	Garfi' (*P. amygdalus* (L.) Batsch)	Nemared' (*P. persica* (L.) Batsch)	1
'GN10'	Garfi' (*P. amygdalus* (L.) Batsch)	Nemared' (*P. persica* (L.) Batsch)	1

Figura 17. 48 genotipos de *Prunus* donde se estudió las regiones promotoras de dos genes implicados en la respuesta a estrés hídrico (PpDhn2 y DREB2B)

Además, se llevó a cabo la caracterización de fuentes naturales de tolerancia a sequía mediante un fenotipado analizando el contenido foliar en minerales y la discriminación del isótopo 13C (Δ13C) en hojas, parámetros relacionados negativamente con el UEA, y un estudio de las regiones promotoras de dos genes implicados en la respuesta a estrés hídrico (PpDhn2 y DREB2B) en 48 genotipos de *Prunus* (Bielsa *et al*., 2018a) (Figura. 17). Se comprobó la correlación positiva entre el contenido foliar en minerales y Δ13C (Figura. 18). Esta relación, en función de los genotipos, reveló que *P. daviniana* es el genotipo con el mayor UEA, seguido por las especies silvestres relacionadas con almendro estudiadas. Estos genotipos silvestres, cuyo origen son principalmente las zonas áridas y montañosas, muestran una adaptación genética a las condiciones climáticas extremas, pudiendo ser seleccionados para la mejora de patrones tolerantes a la sequía como fuente potencial de genes relacionados con un mejor UEA. Por otra parte, con un menor UEA se encontraban la serie almendro × melocotonero: Garnem®, Felinem®

y Monegro®, y su parental masculino, 'Nemared'. En cambio, su parental femenino, el almendro 'Garfi', tenía un UEA similar a las especies silvestres relacionadas con almendro. Además, al comparar los resultados entre Garnem®, Felinem® y Monegro®, destaca este último por su UEA superior (Bielsa *et al*., 2018ª) y así se ha comprobado en una variedad extrataradia Vialfas, (Figura19). Y como el uso eficiente del agua está relacionado con el vigor, se puede observar con el portainjerto Pilowred®, posee un Uso Eficiente del Agua (UEA) mayor que sus tres hermanos híbridos más vigorosos (Figura 20), siendo su valor y correlación cercano al del almendro Garfi que es su parental feménino.ura8El análisis de las regiones promotoras de los genes PpDhn2 y DREB2B, reveló el importante papel de los elementos cis identificados (elementos ABRE, Myc, Myb, HSE, etc.) en las rutas de señalización ABA-dependiente e -independiente, poniendo de manifiesto su interconexión. También se encontraron elementos LTRE en el promotor de DREB2B que evidencian su posible implicación en el estrés por bajas temperaturas. En el promotor de PpDhn2 se localizaron, a su vez, elementos relacionados la respuesta a frío, ritmos circadianos, el desarrollo meristemático y la expresión hormonal, entre otros, destacando un papel más amplio en otros procesos metabólicos (Bielsa *et al.,* 2018a).

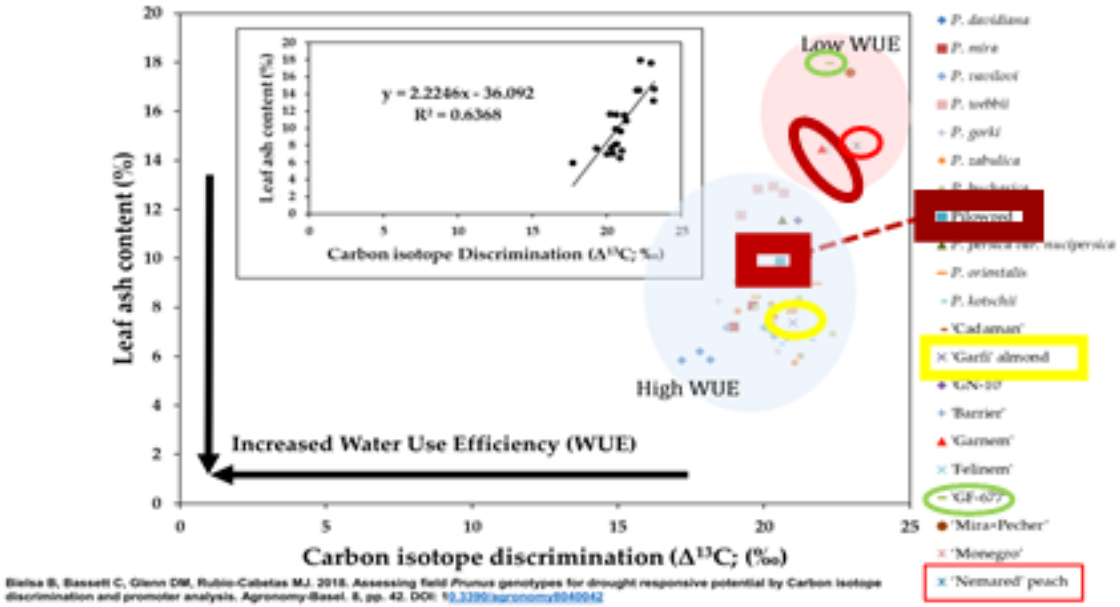


Figura. 18. Correlación positiva entre el contenido foliar en minerales y Δ13C y su relación con el Uso eficiente del agua

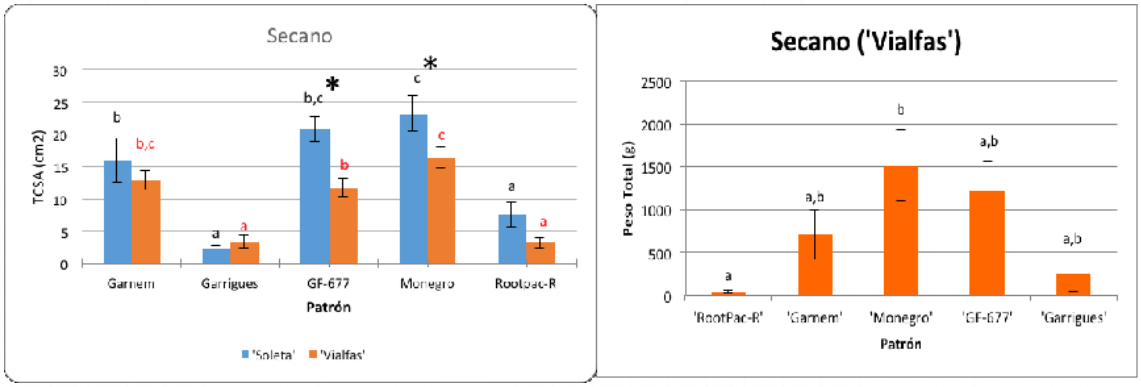
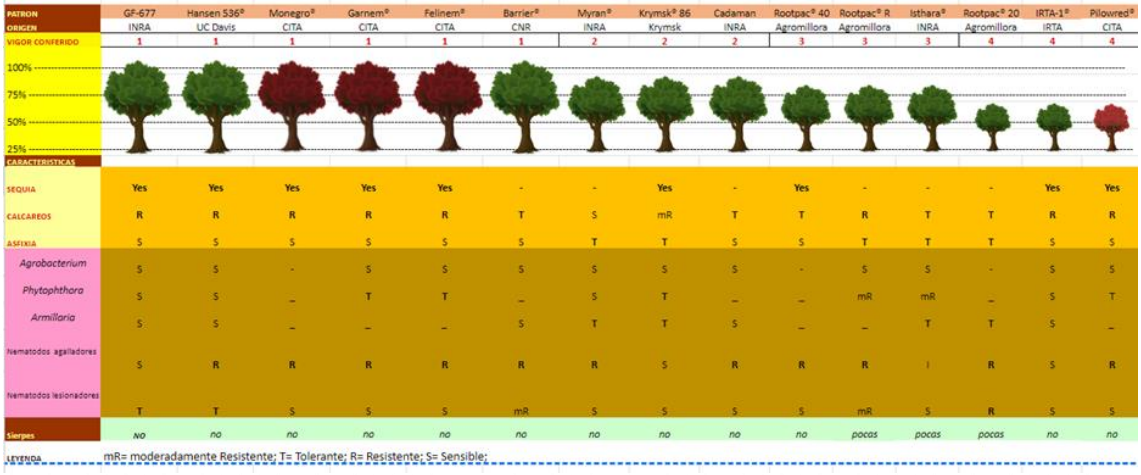


Figura 19. Producción de patrones vigoroso con una variedad de almendro. Se observa l mayor producción del patrón Monegro

Tras el análisis en conjunto de todos los resultados obtenidos se puede concluir que las alteraciones fisiológicas, bioquímicas, transcriptómicas y a nivel proteómico revelarían la puesta en marcha de mecanismos de evitación, primeramente, y de tolerancia después, que permitirían la adaptación de Garnem® bajo condiciones de sequía. Además, destacan ocho genes candidatos para la selección de portainjertos *Prunus* tolerantes a la sequía: los genes ppa008651m, PpDhn1, PpDhn2 y DREB2B; además de los DEGs: ERF023; LRR receptor-like serine/threonine-kinase ERECTA y NF-YB3, por su relación con una mejor UEA; y finalmente el DEG Myb44, represor de la fosfatasa PPC2, validado mediante qRT-PCR. Estos resultados pueden contribuir a mejorar el conocimiento existente sobre los cambios en respuesta a la sequía. La comprensión de estas estrategias de evitación y tolerancia ayudarán a proponer nuevos retos en la mejora de la tolerancia a la sequía en portainjertos *Prunus*.



PATRON	GF-677	Hansen 536®	Monegro®	Garnem®	Felinem®	Barrier®	Myran®	Krymsk® 86	Cadaman	Rootpac® 40	Rootpac® R	Isthara®	Rootpac® 20	IRTA-1®	Pilowred®
ORIGEN	INRA	UC Davis	CITA	CITA	CITA	CNR	INRA	Krymsk	INRA	Agromillora	Agromillora	INRA	Agromillora	IRTA	CITA
VIGOR CONFERIDO	1	1	1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4	4
CARACTERISTICAS															
SEQUIA	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	-	-	Yes	-	Yes	-	-	-	Yes	Yes
CALCAREOS	R	R	R	R	R	T	S	mR	T	T	R	T	T	R	R
ASFIXIA	S	S	S	S	S	S	T	T	S	S	T	T	T	S	S
Agrobacterium	S	S	-	S	S	S	S	S	S	-	S	S	-	S	S
Phytophthora	S	S	_	T	T	_	S	T	_	_	mR	mR	_	S	T
Armillaria	S	S	_	_	_	S	T	T	S	_	_	T	T	S	_
Nematodos agalladores	S	R	R	R	R	R	R	S	R	R	R	I	R	S	R
Nematodos lesionadores	T	T	S	S	S	mR	S	S	S	S	mR	S	R	S	S
Sierpes	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no	pocas	pocas	pocas	no	no

LEYENDA: mR= moderadamente Resistente; T= Tolerante; R= Resistente; S= Sensible;

Figura 20. Vigor conferido por diferentes patrones de Almendro y Melocotonero (Felipe et al., 2022)

2. Especies de *Prunus*. Los almendros autoenraizados

Dentro de las especies de *Prunus* utilizadas como patrones de melocotonero, han sido los patrones GF-677 y Garnem (GxN-15) los más utilizados en España y en otros países de la cuenca mediterránea. Ambos por contar como parental el almendro aportan una mejor eficiencia en el uso del agua que los ciruelos o bien que los híbridos interespecíficos de estos, aunque ya hemos comentado que existen diferencias entre los híbridos (Figura 18). Por su vigor elevado y alta capacidad de exploración, han aportado un buen comportamiento en condiciones de limitación de agua de riego y éstas han sido también los motivos, entre otros, de su masiva utilización en almendro, tanto en secano como en regadío, pero ni siempre con iguales resultados.

El almendro pertenece a la especie *Prunus dulcis*, una especie típicamente mediterránea y por lo tanto bien adaptada a períodos de estrés hídrico que caracterizan esta área. Es por ello que su sistema radicular es el que presenta una mejor adaptación a estrés hídrico con respecto a otras especies de *Prunus*. En el lado opuesto se encuentra el ciruelo, que es el que presenta la peor adaptación debido a su origen botánico al proceder de zonas donde el agua es abundante.

Durante siglos el franco de semilla amarga ha sido el patrón de almendro más utilizado en secano, hasta la llegada a finales del siglo XX de los híbridos almendro x melocotonero y otros híbridos interespecíficos del género *Prunus*. El disponer de variedades como 'Garrigues' que su

semilla era más uniforme y de vigor medio, hizo que esta opción fuera ampliamente utilizada hasta la llegada de los híbridos anteriormente mencionados hace más de cuatro décadas, pero al ser uno de sus parentales el melocotonero su tolerancia a la sequía era menor que el franco de almendro, o que la selección clonal 'Garfi'. (Felipe *et al*., 2022).

Buscando ésta tolerancia al estrés hídrico que aporta el sistema radicular del almendro hacia 2015 se empezó a desarrollar por parte de Agromillora la opción de los almendros autoenraizados de diversas variedades como 'Avijor', 'Penta' o 'Vialfás', entre otras. La innovación, además de tratarse de árboles sobre sus propias raíces, radica en que estos almendros se conducen en un seto de menores dimensiones de copa que en regadío, con un volumen de copa adaptado fácilmente adaptable a la disponibilidad hídrica de cada zona mediante la poda mecánica (Iglesias, 2021).

Además, tanto la poda como la recolección se mecanizan casi por completo. Las primeras experiencias realizadas en España a escala comercial cuentan ya con árboles de 6 años de edad (Figura 21)

En las zonas donde las condiciones climáticas han sido favorables (no afección por heladas y pluviometría normal) se han recolectado entre 600 y 1.100 kg/ha de pepita. Numerosas experiencias en curso en centros de investigación y en fincas comerciales, permitirán aportar en años venideros información acerca de cuáles son las variedades mejor adaptadas a esta tecnología y cuáles son las mejores condiciones edafo-climáticas. Por supuesto que en las situaciones de mayor variabilidad de las precipitaciones y de menor pluviometría anual, el riego de soporte (1.500-2.500 m^3 /ha) permitirá una mayor estabilidad a las producciones.

Figura 21. Recolección de almendros autoenraizados en su tercer verde en Córdoba (izquierda) y su sistema radicular, árbol de tres años en Almudevar-Huesca, donde se observan las raíces muy potentes con una gran capacidad exploratoria

3. Frutales de pepita

3.1. Portainjertos de Manzano adaptados a la sequía.

En los climas cálidos del sur de Europa el manzano se encuentra mayoritariamente en zonas de regadío debido a las bajas pluviometrías anuales. En áreas con mayores pluviometrías del norte

de España o del norte de Europa, su cultivo se realiza sin riego y se ha basado tradicionalmente en patrones francos o clonales de vigor medio a elevado. Sin embargo, en la fruticultura moderna cada vez más la producción se basa en plantaciones intensivas donde el uso del patrón M9 y sus selecciones es mayoritario. Este patrón por su sistema radicular limitado (Fotografía 21, izq) es enanizante y constituye la base de las modernas plantaciones en todos los países del mundo. Otros patrones clonales como el MM-106 o el MM-111, ampliamente utilizados en el pasado, se usan poco en la actualidad (Figura 22, der.).

Figura 22. Patrón enanizante M-9 (izquierda) y patrón de vigor medio alto MM-111 (derecha)

Por tratarse de un frutal donde el riego es habitual en nuestras zonas de cultivo, no se han realizado ensayos comparativos de cómo este afecta el estrés hídrico de los diferentes patrones, en comparación con el almendro como especie mayoritariamente cultivada en secano.

Evidentemente un mayor vigor y mayor capacidad exploratoria del sistema radicular (M-106, MM-111 o MI-793, etc.) (Figura 23), está relacionada con una mejor tolerancia al estrés hídrico en comparación con los patrones enanizantes tipo M9 con un sistema radicular más reducido y superficial. Datos recientes procedentes de Brasil indican que algunos patrones de la serie "Geneva" (Cornell-Geneva, US) como el G-213 aportan una mayor tolerancia a la sequía con respecto al M-9.

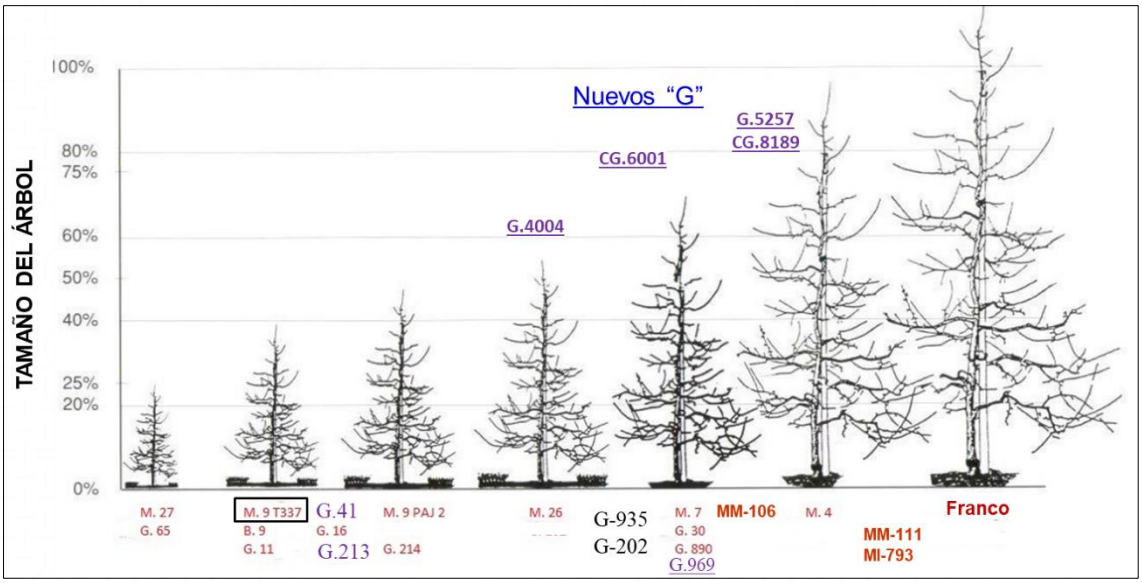


Figura 23. Vigor conferido por diferentes patrones de peral (Iglesias *et al,* 2022)

3.2. Portainjertos de peral adaptados a la sequía

Al igual que el manzano, el peral en los climas cálidos del sur de Europa, se cultiva mayoritariamente en secano debido a las bajas pluviometrías estivales. Para esta especie se han utilizado durante siglos francos de semilla procedentes generalmente de las industrias conserveras, al igual que en el melocotonero, que confieren un vigor considerable a las variedades sobre él injertadas. Estos patrones se basan en una raíz pivotante acompañada por otras laterales de menor vigor, que le confiere una alta capacidad de exploración de horizontes profundos en comparación con los membrilleros con un sistema radicular más fasciculado, superficial y con raíces de menor tamaño. Dentro de los membrilleros se dan diferencias importantes de vigor y por tanto de capacidad exploratoria del suelo y de tolerancia al estrés hídrico. Así el de menor vigor y más sensible al estrés hídrico es el M-C, le siguen el M-A y Sydo dentro del tipo Angers y el BA-29 del tipo Provence como el de mayor vigor y el más tolerante a la sequía de los membrilleros por proceder de la región de Provence (Francia). A lo largo de la última década se han introducido a escala comercial diferentes ptrones del género *Pyrus* que aportan un vigor intermedio entre el BA-29 y el franco de peral Kirschensaller (Figura 24). No se dispone todavía de información acerca de su comportamiento frente a situaciones de estrés hídrico en las condiciones edafo-clímáticas del Valle del Ebro.

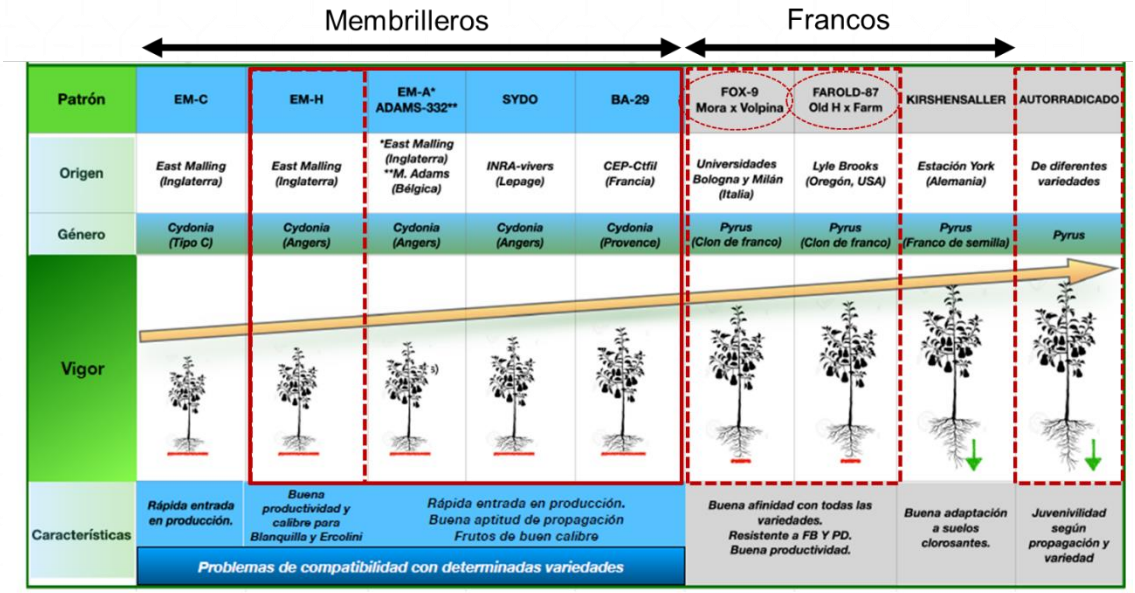


Figura 24. Vigor conferido por diferentes patrones de peral (Iglesias, 2023).

En condiciones climáticas caracterizadas por temperaturas estivales cada vez más elevadas por el cambio climático, los membrilleros presentan una mayor sensibilidad al estrés hídrico debido a la distribución más superficial de las raíces en comparación con los francos (Figura 25). Además, por su origen botánico, el membrillero esta más adaptado a la abundancia de agua que a la escasez, al contrario que el peral que no tolera la asfixia radicular.

Al igual que en el manzano apenas se disponen de experiencias de cuales son dentro del grupo de los francos o de los membrilleros, los patrones de peral mejor adaptados al estrés hídrico.

Figura 25. Patrón de membrillero Provence BA-29 (izquierda) y patrón franco Kirschensaller (derecha)

4. Especies de Cítricos

Dentro de este grupo de frutales que comprende diversas especies (naranja, limón, mandarina, etc..), se da una importante variabilidad con respecto a las necesidades hídricas y a la tolerancia al estrés hídrico. En la fotografía inferior correspondiente a la zona citrícola de Sao Paulo (Brasil), se ilustra como patrones que confieren un vigor similar (Cravo Limeira, Cleopatra x Rubidoux o Sunki BRS Tropical) toleran mejor por la sequía. Al igual que en fruta dulce los patrones enanizantes (Flying Dragon o CLeopatrax Barnes-245), muestran una mayor sensibilidad (Figura 26). Cabe recordar que alrededor el 80% de la citricultura brasilera se encuentra en secano, en el denominado cinturón citrícola.

Figura 26. Comportamiento diferencial de diferentes patrones de cítricos frente a la sequía extrema. Bebedouro, Sao Paulo (Brasil), Octubre de 2020 (Foto: Eduardo Gerardi)

Bibliografía

Belin, C.; Thomine, S.; Schroeder, J.I. (2010). Water Balance and the Regulation of Stomatal Movements. En: Pareek, A., Sopory, S.K., Bohnert, H.J. (Eds.), Abiotic Stress Adaptation in Plants: Physiological, Molecular and Genomic Foundation. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 283–305. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3112-9

Bielsa, B.; Bassett, C.; Glenn, D.M.; Rubio-Cabetas, M.J. (2018a). Assessing field Prunus genotypes for drought responsive potential by Carbon isotope discrimination and promoter analysis. Agronomy. 8:42. https://doi.org/10.3390/agronomy8040042

Bielsa, B.; García-Brunton, J.; Sanz, M.A.; Rubio-Cabetas, M.J. (2019a). Caracterización de la respuesta adaptativa a sequía de dos cultivares de melocotonero en condiciones de aridez. ITEA-Información Técnica Económica Agraria. 115(4):307-325. DOI: https://doi.org/10.12706/itea.2019.010

Bielsa, B.; Hewitt, S.; Reyes-Chin-Wo, S.; Dhingra, A.; Rubio-Cabetas, M.J. (2018b). Identification of water use efficiency related genes in 'Garnem' almond-peach rootstock using time-course transcriptome analysis. PLoS ONE. 13(10): e0205493. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205493

Bielsa, B.; Leida, C.; Rubio-Cabetas, M.J. (2016). Physiological characterization of drought stress response and expression of two transcription factors and two LEA genes in three Prunus genotypes. Scientia Horticulturae. 213:260-269. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.11.006

Bielsa, B.; Sanz, M.A.; Rubio-Cabetas, M.J. (2019b). Uncovering early response to drought by proteomic, physiological, and biochemical changes in the almond × peach rootstock 'Garnem'. Functional Plant Biology. 46(11), 994. https://doi.org/10.1071/FP19050

Chaves, M.M.; Flexas, J.; Pinheiro, C. (2009). Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell. Annals of Botany. 103(4):551-560. https://doi.org/10.1093/aob/mcn125

Christman, A.; Grill, E.; Huang, J. (2013). Hydraulic signals in long-distance signaling. Curr. Opin. Plant Biol. 16(3):293-300. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.02.011

Reig, F.; Vicente-Serrano, S.M.; Beguería, S; Latorre, B.; Luna, Y.; Morata, A. (s.f.) Monitor de sequía meteorológica. CSIC. https://monitordesequia.csic.es/monitor/?lang=es#index=spei#months=1#week=4#month=0#year=2024

Felipe, A.J.; Rius, X.; Rubio-Cabetas, M.J. (2022). El cultivo del almendro. Segunda Edición. In Felipe, Rius X. Rubio-Cabetas MJ, (Eds.) 567pp ISBN: 978-0-646-85851-7

Fraga et al., (2023). Efficient water use in olive groves in a context of climate change. CIHEAM. Septiembre 2023.

Iglesias, I. (2021). #reinventamos los secanos: el almendro autoenraizado en seto. Revista de Fruticultura, 72, 32-47.

Iglesias, I.; Dallabetta, N.; Macedo, T.; Monturiol, A.; Giori, M.; Rufato, L.; Fazio, G. (2022). Sistemas de formación en manzano: situación e innovación para una producción eficiente y sostenible. Revista de Fruticultura. Especial Manzano, 36-75.

Iglesias, I. (2023). Innovación tecnológica en el cultivo del peral: material vegetal, sistemas de conducción y protección del cultivo. Comunicación personal. Jornada Técnica. ETSEA Lleida, 31 noviembre de 2023.

IPCC. (2023). Summary for Policymakers. En: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the

Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (Eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001

Vicente-Serrano, S.M.; Tomas-Burguera, M.; Beguería, S.; Reig, F.; Latorre, B.; Peña-Gallardo, M.; Luna, M.Y.; Morata, A.; González-Hidalgo, J.C. (2017). A High Resolution Dataset of Drought Indices for Spain. Data. 2:22. https://doi.org/10.3390/data2030022

Verslues, P.E.; Agarwal, M.; Katiyar-Agarwal, S.; Zhu, J.; Zhu, J. (2006). Methods and concepts in quantifying resistance to drought, salt and freezing, abiotic stresses that affect plant water status. The Plant Journal. 45(4): 523-539. https://doi.org/10.1111/j.1365-313X.2005.02593.x

Tejedor, E; de Luis, M.; Cuadrat, J.M.; Esper, J.; Saz, M.A. (2016). Tree-ring-based drought reconstruction in the Iberian Range (east of Spain) since 1694. Int. J. Biometeorol. 60:361–372. https://doi.org/10.1007/s00484-015-1033-7

Takahashi, F.; Kuromori, T.; Sato, H.; Shinozaki, K. (2018). Regulatory Gene Networks in Drought Stress Responses and Resistance in Plants. En: Iwaya-Inoue, M., Sakurai, M., Uemura, M. (Eds.) Survival Strategies in Extreme Cold and Desiccation. Advances in Experimental Medicine and Biology, vol 1081. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1244-1_11

Rubio-Cabetas, M.J.; Felipe, A.J.; Reighard, G.L. (2017). Rootstock Development. En: Socias i Company, R., Gradziel, T.M. (Eds.), Almonds. Botany, Production and Uses. CABI, USA, pp. 209–227.

Lind, C.; Dreyer, I.; López-Sanjurjo, E.J.; von Meyer, K.; Ishizaki, K.; Kohchi, T.; Lang, D.; Zhao, Y; Kreuzer, I.; Al-Rasheid, K.A.S.; Ronne, H.; Reski, R.; Zhu, J.-K.; Geiger, D.; Hedrich, R. (2015). Stomatal Guard Cells Co-opted an Ancient ABA-Dependent Desiccation Survival System to Regulate Stomatal Closure. Curr. Biol. 25(7):928-935. https://doi.org/10.1016/j.cub.2015.01.067

Kim, T.H.; Böhmer, M.; Hu, H.; Nishimura, N.; Schroeder, J.I. (2010). Guard Cell Signal Transduction Network: Advances in Understanding Abscisic Acid, CO2, and Ca2+ Signaling. Annu. Rev. Plant Biol. 61:561–591. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112226

SOLUT-ION innovación medioambiental de la tecnología

IOLAND es una empresa tecnológica del Grupo Garcés Garcés con la misión de rentabilizar la agricultura proporcionando herramientas que optimizan y automatizan la gestión de cualquier explotación.

La tecnología IOLAND recopila la información en tiempo real, facilitando la toma de decisiones por parte del responsable del cultivo y dando una visión empresarial a cada recurso, capaces de ahorrar entre un 20% y un 40% en el consumo de agua y fertilizantes, lo que conlleva a un ahorro de combustible y energía. Estas herramientas se focalizan en dos de los pilares más importantes de la agricultura: riego y nutrición.

El control del estado nutricional de la planta es esencial para evitar la aparición de deficiencias nutricionales, donde la fertiirrigación es de vital importancia para el manejo del cultivo. La investigación en agricultura está avanzando en conocimientos y en concienciación medioambiental, y en ese proceso de tecnificación, se necesitan herramientas que nos ayuden a comprender cómo y porqué se lixivian agua y determinados nutrientes en el suelo. Si se evita la pérdida de agua manteniendo el potencial de nuestro cultivo o incluso mejorándolo, estrechamente se mejora la eficiencia de absorción de los nutrientes aportados en el riego evitando así la lixiviación de estos.

IOLAND, en respuesta a la problemática ambiental, ha creado SOLUT-ION, un robot agrícola que presenta un sistema de monitorización de iones de la solución del suelo de forma continua, a tiempo real.

.

Con SOLUT-ION, el agricultor puede realizar una fertilización más precisa y eficaz, reduciendo el volumen de abono y evitando posibles toxicidades de estos. Con este proyecto se enfrenta a un gran reto tecnológico, ya que se trata de un sistema inexistente en el mercado actual y supone una novedad disruptiva en el mercado agrícola presente.

Este robot agrícola toma muestras periódicas de la solución del suelo mediante un lisímetro de vacío acoplado, que posteriormente analiza por sondas específicas que le permiten determinar la concentración de los iones: NO_3^- , NH_4^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Cl^- y Na^+, presentes en el suelo. Estos valores son volcados en la plataforma IOLAND desarrollada por nuestro equipo de agrónomos, y puesta al servicio de los agricultores y técnicos.

El decidir el momento del riego y del abonado es de transcendental importancia para ser eficientes, tanto para evitar pérdidas hídricas como para potenciar el estado vegetativo de la planta

GRUPO GARCÈS GARCÈS

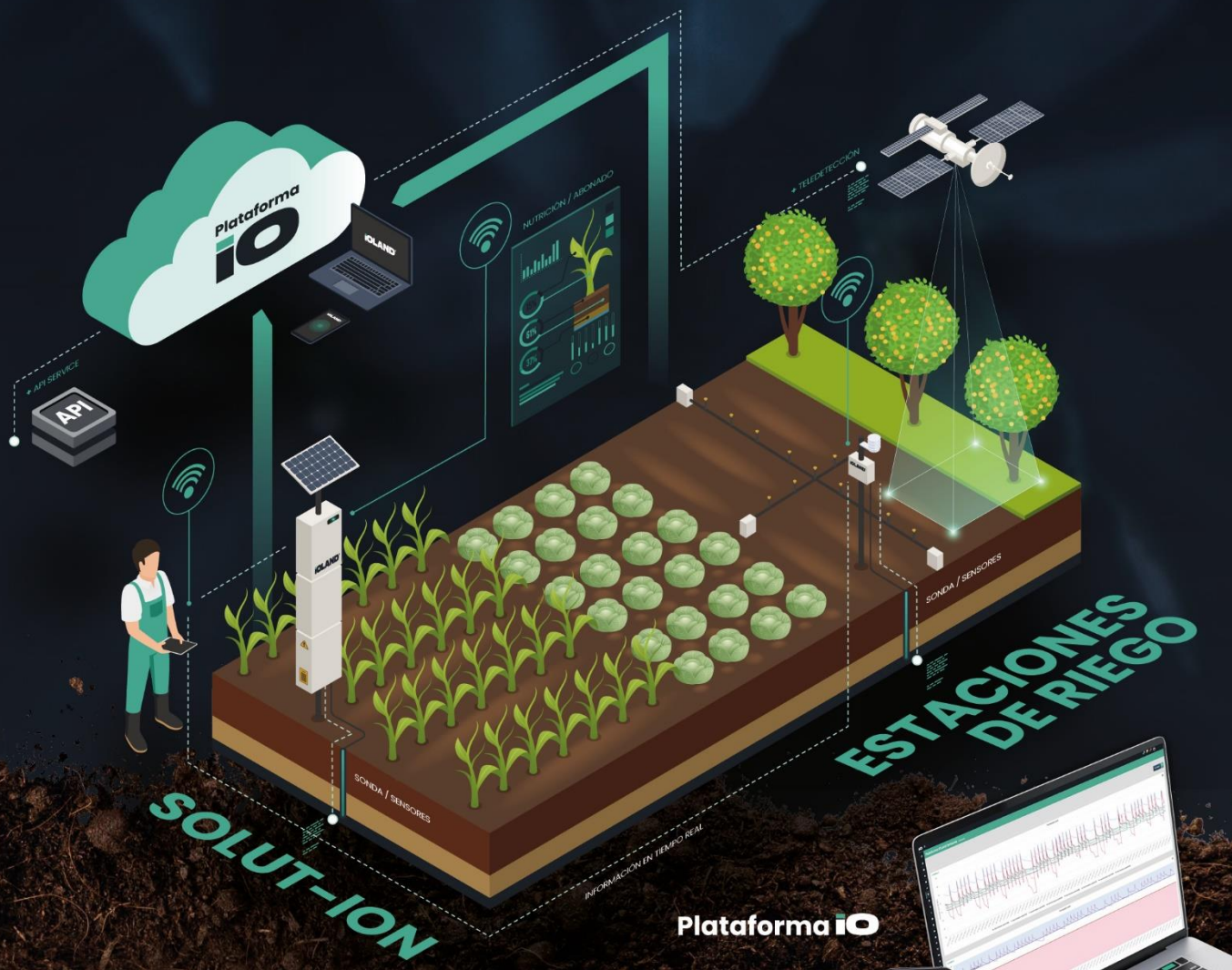
iOLAND®

Fertilización de precisión

Mejoramos tu huella hídrica

Monitoreo del estado del suelo en tiempo real

Acompañamiento agrícola



ESTACIONES DE RIEGO

SOLUT-ION

Plataforma iO

Colaboradores:

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

ivia Institut Valencià d'Investigacions Agràries

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agronòmica i del Medi Natural

Institute ITACA Information and Communication Technologies | BDSLab BIOMEDICAL DATA SCIENCE LAB

PYME INNOVADORA
Válido hasta el 02 de junio de 2025

iOLAND seleccionada como una de las 15 mejores startups de tecnología agroalimentaria por AgroBank

La agricultura evoluciona y nosotros con ella

#conectadosalatierra

ioland.es

Regaber
matholding group

LO MEJOR EN **SOSTENIBILIDAD HÍDRICA**

Trabajamos para aumentar la eficiencia en el transporte y distribución del agua de riego. Desde grandes canales hasta la última gota que llega al cultivo.

#calidad #experiencia #servicio, #tranquilidad #agriculturaSostenible.

4.6. Patrones de cítricos adaptados al déficit hídrico

Amparo Primo-Capella[1], Eduardo Augusto Girardi[2], Ignasi Iglesias Castellarnau[3], María Ángeles Forner-Giner[1], Mary-Rus Martínez-Cuenca[1]*

[1] *Centro de Citricultura y Producción Vegetal, Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias*
[2] *Embrapa Yuca y Frutas, Fundo de Defesa da Citricultura/Fundecitrus*
[3] *Agromillora Group*

* *martinez_mru@gva.es*

Índice

1. Introducción 436
2. Respuesta fisiológica 436
3. Programas de mejora 438
4. Patrones enanizantes 441
5. Efecto sobre el crecimiento de la planta 441
6. Efecto sobre la producción y la calidad de la fruta 443

Resumen

El déficit hídrico es uno de los estreses abióticos que más preocupan a nivel mundial, ya que limita la producción, la calidad y el rendimiento de los cultivos, entre ellos los cítricos. Dado que el empleo de agua en la agricultura de regadío representa más del 70% de todos los diferentes usos en el mundo, una pequeña reducción en el consumo de agua de riego podría conducir a un aumento significativo de su disponibilidad para el resto de las aplicaciones.

En particular en la costa mediterránea de España (298.000 ha en 2022), con un clima semiárido y una media anual de precipitaciones de 350-400 mm, el cultivo de cítricos requiere el aporte hídrico mediante sistemas de riego para que sean comercialmente viables. A pesar de esto, y para optimizar el uso del agua es necesario desarrollar nuevas estrategias o técnicas de programación del riego que impliquen un menor consumo de agua, una mayor producción y una óptima calidad del fruto.

Este trabajo revisa los efectos del estrés hídrico en los procesos de desarrollo del cultivo y las respuestas fisiológicas de la planta para mitigarlos, desde el punto de vista de las relaciones hídricas en la planta, respuesta fotosintética, crecimiento, productividad y calidad de la fruta. El tema se complica por la diversidad de especies y cultivares (incluidos los patrones) que se incluyen dentro de *Citrus* spp.

1. Introducción

Los cítricos se cultivan ampliamente a lo largo de la costa mediterránea de España (298.000 ha en 2022; MAGRAMA, 2023), que con un clima semiárido y una media anual de precipitaciones de 350-400 mm (AEMET, 2023), hace necesario el aporte hídrico mediante sistemas de riego para que sean comercialmente rentables. En esta región, los problemas de desertificación y cambio climático están aumentando los períodos de sequía e inundaciones en los sistemas agrícolas. En consecuencia, es necesario desarrollar nuevas estrategias o técnicas de programación del riego para optimizar el uso del agua que impliquen un menor consumo de agua, una mayor producción y una óptima calidad del fruto. Este preocupante escenario, presente y futuro, es similar en otras regiones citrícolas bajo climas tropicales y subtropicales de todo el mundo (Fares *et al.*, 2017).

La forma más directa de cumplir este requisito es reducir las dosis de agua, y un ejemplo es el Riego Deficitario Controlado (RDC) (Ruiz *et al.,* 2010; Ballester *et al*., 2011), práctica que se basa en que las demandas de los árboles dependen tanto del material vegetal como del momento fenológico durante el ciclo del cultivo (González-Altozano *et al.,* 1999). Los cítricos se consideran un cultivo sensible al déficit hídrico (Colmenero-Flores *et al.*, 2020) y la demanda de agua en algunos estados fenológicos, como la floración y el cuajado, es crítica (Fereres y Soriano, 2007). Un aporte de agua reducido en estos momentos aumenta la caída de fruto en junio y, por tanto, repercute en la producción del cultivo (García-Tejero *et al*., 2010). Además, las restricciones de agua en la última fase de crecimiento y maduración del fruto también pueden disminuir el rendimiento al reducir el peso final del fruto (González-Altozano y Castle, 1999; García-Tejero *et al.,* 2010; Pérez-Pérez *et al*., 2009). Sin embargo, existen estados fenológicos menos sensibles en los cuales podemos restringir el suministro de agua sin afectar a la producción.

Otro modo de actuación es con la correcta elección del material vegetal. Es decir, utilizando patrones que presenten ventajas adaptativas al estrés por déficit hídrico y que son capaces de conferir esa cualidad al conjunto de la planta, esto es a la combinación con la variedad. En este sentido, se ha observado que el manejo del riego es menos crítico para la calidad externa de la fruta de árboles de naranjos dulces injertados sobre citranges que sobre mandarino Cleopatra (Treeby *et al*., 2007). Y que el uso de portainjertos tetraploides de lima Rangpur parece aumentar la tolerancia a la sequía de naranja en comparación con sus clones diploides en cítricos (Allario *et al.,* 2013).

2. Respuesta fisiológica

El crecimiento y desarrollo de la planta está influenciado por la disponibilidad de agua, ya que interviene prácticamente en todos los procesos fisiológicos. Por tanto, un déficit hídrico afecta negativamente a funciones fisiológicas vitales como fotosíntesis, respiración, reacciones metabólicas, crecimiento, reproducción, desarrollo de semillas, absorción de minerales, transporte de asimilados y producción de la planta (Quiñones *et al.,* 2007; García-Sánchez *et al.,* 2003; Ortuño *et al.,* 2004). El efecto dependerá de la intensidad de la sequía, duración y de la época en que ocurre dentro del ciclo del cultivo (Ballester *et al.,* 2011). Sin embargo, las plantas están sometidas constantemente a condiciones ambientales desfavorables, más aún en el actual

contexto de cambio climático; y es por ello, que desarrollan mecanismos adaptativos de protección ante este estrés abiótico, combinando factores anatómicos y fisiológicos que limitan el almacenamiento y transporte del agua.

Entre las adaptaciones morfológicas se incluyen el desarrollo de raíces profundas con capacidad para explorar un amplio perfil del suelo, y alteraciones en la morfología de las hojas y la estructura de la cutícula (Shukla *et al*., 2012). El sistema radicular tiene una gran importancia cuando la planta se enfrenta a la sequía. Por ejemplo, los árboles injertados sobre el patrón limón rugoso, que cuenta con un sistema radical más extenso y profundo que otros patrones, son más tolerantes a la sequía. O una planta con una gran masa de hojas en relación con el sistema de raíces será propensa al estrés por sequía porque las hojas tienden a perder agua más rápido de lo que las raíces pueden absorber. Además, modificaciones en el desarrollo de la banda de Caspary o depósitos de suberinas en las células de la exodermis y endodermis de las raíces reducen la conductancia hidráulica en el sistema radical bajo condiciones de déficit hídrico (Enstone y Peterson, 1998).

Como respuestas fisiológicas en cítricos encontramos, entre otras: 1) la disminución en la conductancia de los estomas, con lo cual se evita la pérdida de agua por transpiración; 2) la inhibición de proteínas tipo PIP o acuoporinas, que intervienen en los canales de absorción y transporte de agua; 3) la abscisión foliar, disminuyendo el área foliar y por tanto la superficie de transpiración; y, 4) la síntesis y acumulación de metabolitos y osmoreguladores compatibles con el funcionamiento normal de la célula (Barry *et al.,* 2004; Pérez-Pérez *et al.,* 2008; Navarro *et al.,* 2010; Rodriguez- Gamir *et al.,* 2010).

La reducción de la transpiración de las hojas se consigue entre otras vías, por el cierre de los estomas localizados generalmente, en el envés y que se cierran en condiciones de estrés hídrico severo, restringiendo el intercambio gaseoso. También, la presencia de distintas capas cerosas en la cutícula de las hojas ayuda en la conservación del agua. El control estomático en las hojas jóvenes, sin embargo, es más reducido ya que son más pobres en ceras epicuticulares y cutina que las hojas viejas. Esta abundante cutícula cerosa en ocasiones ocluye los estomas, lo que representa una reducida pérdida de agua y de CO_2 (Ortuño *et al*., 2004; Tudela y Primo-Millo, 1992). Otra adaptación al estrés durante la deshidratación es el cambio en los ángulos de inclinación de las hojas, con el fin de reducir la superficie foliar y la radiación interceptada, y disminuir la transpiración.

Este estrés afecta de diferente manera e intensidad a los distintos estados de crecimiento, siendo un ejemplo claro la fase de fecundación, ya que aumenta el aborto floral y la abscisión del fruto (González-Altozano y Castel, 2003). Y en condiciones de estrés hídrico severo se desarrollan mecanismos de ajuste elástico (Savé *et al.,* 1995), esto es, el aumento de la elasticidad de las paredes celulares con el objeto de mantener la turgencia celular y facilitar la continuidad de procesos esenciales como la utilización de nutrientes y asimilados, la fotosíntesis y, por lo tanto, el crecimiento en general (Huang *et al.,* 2000). Cuando el déficit hídrico es moderado no se desarrollan mecanismos de ajuste elástico (Savé *et al.,* 1995).

Otra respuesta habitual en estrés abiótico y en concreto en déficit hídrico, es el reajuste hormonal. Una de las principales hormonas relacionadas con este estrés es el ácido abscísico (ABA) que tiene una doble función en la protección de los cítricos frente al estrés hídrico. 1) A

corto plazo, reduce la transpiración debido a que el suministro de ABA a las hojas produce el cierre inmediato de los estomas (Mahouachi *et al*., 2005). El estrés reduce el gradiente de pH entre el citoplasma y el apoplasto y debido a que el contenido de ABA es mayor donde el pH es más elevado se promueve el flujo de ABA desde la célula. Por tanto, los niveles de ABA aumentan en el apoplasto antes que en cualquier otro lugar de la hoja. 2) A largo plazo induce la síntesis de proteínas que aumentan la tolerancia de la planta a la desecación. La expresión génica de los genes de síntesis de ABA se activan en respuesta a la sequía y son puntos de regulación de la tolerancia de los cítricos frente a la desecación (Gimeno *et al.,* 2009). Además, las evidencias indican que el ABA producido en las raíces puede actuar como una señal mediante la cual las plantas regulan su estado hídrico en los suelos secos (Mahouachi *et al.,* 2005; Zhang y Outlaw, 2001). Referente a otras hormonas, los cítricos bajo condiciones limitantes de agua aumentan el contenido de ácido abscísico, ácido jasmónico y ácido salicílico, mientras que el contenido de giberelinas disminuye rápidamente, aunque se recobra nuevamente al reanudar el riego (Mahouachi *et al*., 2005). La concentración de etileno también aumenta provocando senescencia foliar, degradación de pigmentos fotosintéticos y abscisión de hojas y frutos.

3. Programas de mejora

En cultivos leñosos, la elección del patrón entra dentro de las decisiones más importantes que un agricultor debe tomar cuando establece su plantación, ya que repercutirá sobre el rendimiento y la calidad de la fruta. Los caracteres deseables en un patrón abarcan desde la tolerancia a importantes estreses bióticos como el virus de la tristeza (CTV), *Phytophthora* o nemátodos, a otros abióticos como salinidad o suelos calizos (Tabla 1). No obstante, en el actual contexto de cambio climático, la optimización de la eficiencia en el uso del agua y la tolerancia a la sequía están cobrando más importancia en los programas de mejora de cítricos en todo el mundo (Tabla 1).

La respuesta del cultivo depende en gran medida del material vegetal, particularmente del patrón, que también puede influir notablemente en la respuesta fisiológica de la variedad al estrés abiótico (Fereres y Sorinao, 2007; Martínez-Cuenca *et al*., 2016; Pestana *et al.,* 2005; Forner-Giner *et al*., 2020). A modo de ejemplo, las plantas que sufren déficit hídrico en el suelo a menudo presentan respuestas fisiológicas adaptativas, como disminución de la conductancia estomática, reducción de la transpiración y aumento de la temperatura de las hojas (Arbona *et al.,* 2005). Cuando esta situación adversa persiste en el tiempo, el crecimiento de las plantas, la producción de frutos y la calidad del zumo disminuyen (Pedroso *et al.,* 2014).

Por todo ello, los programas de mejora de cítricos, y en concreto el desarrollado en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA, España), se centran en desarrollar nuevos patrones híbridos que se adapten a los principales estreses abióticos de la Comunidad Valenciana, incluyendo el déficit hídrico. Ello permitirá ahorrar agua en nuestras explotaciones y que el cultivo de los cítricos se convierta en sistemas más ecológicos y sostenibles, en especial en el actual contexto de cambio climático. Así, el híbrido Forner-Alcaide no. 5 (FA-5, mandarino 'Cleopatra' × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) se ha propuesto como una buena alternativa al citrange Carrizo (CC, *Citrus sinensis* (L.) Osb. × *Poncirus trifoliata* (L.) Raf.) bajo estrés por salinidad o clorosis férrica, y al déficit hídrico en condiciones de invernadero (Martínez-Cuenca *et al.,* 2016;

López-Climent *et al.,* 2008; Simón-Grao *et al.,* 2019; Gómez-Cadenas *et al*., 2003) y ya se utiliza en el 15% de las explotaciones españolas. Otros materiales vegetales híbridos de Poncirus obtenidos por el grupo como los patrones enanos, son también de interés ya que reducen el tamaño de la planta sin comprometer la rentabilidad de la explotación y facilitan el manejo del cultivo (tratamientos fitosanitarios, poda, recolección…).

Un caso de especial interés es lo que está sucediendo en Brasil, principal país productor de naranjas para la industria del zumo. El 60% de los cítricos brasileños se cultiva sin riego en el llamado cinturón cítrico, bajo un clima subtropical a tropical y suelos profundos, arcillosos, ácidos y férricos. Por tanto, la capacidad de las plantas para desarrollarse en condiciones de baja disponibilidad de agua es de máximo interés en esta región. Tradicionalmente, la lima Rangpur y el limón Volkameriana son más tolerantes a la sequía, pero más sensibles a muchas enfermedades. Así, Embrapa y el Centro de Citricultura Sylvio Moreira obtuvieron nuevas selecciones e híbridos, como la mandarina Sunki BRS Tropical o la citrimoniandarina BRS Bravo (Sunki × (Rangpur × *P. trifoliata*)) (Costa *et al*., 2020). En general, estos nuevos patrones son vigorosos o medianos y tienen raíces profundas, mientras que otros patrones, particularmente los enanos como *P. trifoliata* Flying Dragon o Cleopatra × Barnes-245, que son más sensibles a la sequía (Figura 1).

Tabla 1. Relación de los patrones de cítricos más utilizados en España, grado de tolerancia a diferentes estreses y comportamiento de los principales caracteres agronómicos. Simbología: Bueno/alto (*****) a pobre/bajo (*), Resistente (R), Susceptible (S), Tolerante (T)

	Citrange Carrizo	**Citrumelo Swingle**	**Mandarino Cleopatra**	***Citrus volkameriana***	***Citrus macrophylla***	**FA-5**	**FA-51**
Plagas y enfermedades							
Tristeza	R	T	T	T	S	R	R
Phytophthora	****	*****	***	*	*****	****	****
Nemátodos	S	R	S	S	S	R	R
Estrés abiótico							
Salinidad	*	***	****	***	****	*****	****
Suelos calizos	**	*	****	****	*****	***	****
Encharcamiento	***	*****	*	***	**	****	****
Estrés hídrico	**	****	***	****	****	****	***
Heladas	****	****	****	**	*	****	****
Parámetros agronómicos							
Tamaño árbol	****	****	****	****	****	****	**
Productividad	***	***	**	****	****	****	****
Tamaño fruto	***	**	**	****	***	***	***
Maduración	****	**	***	****	****	****	****

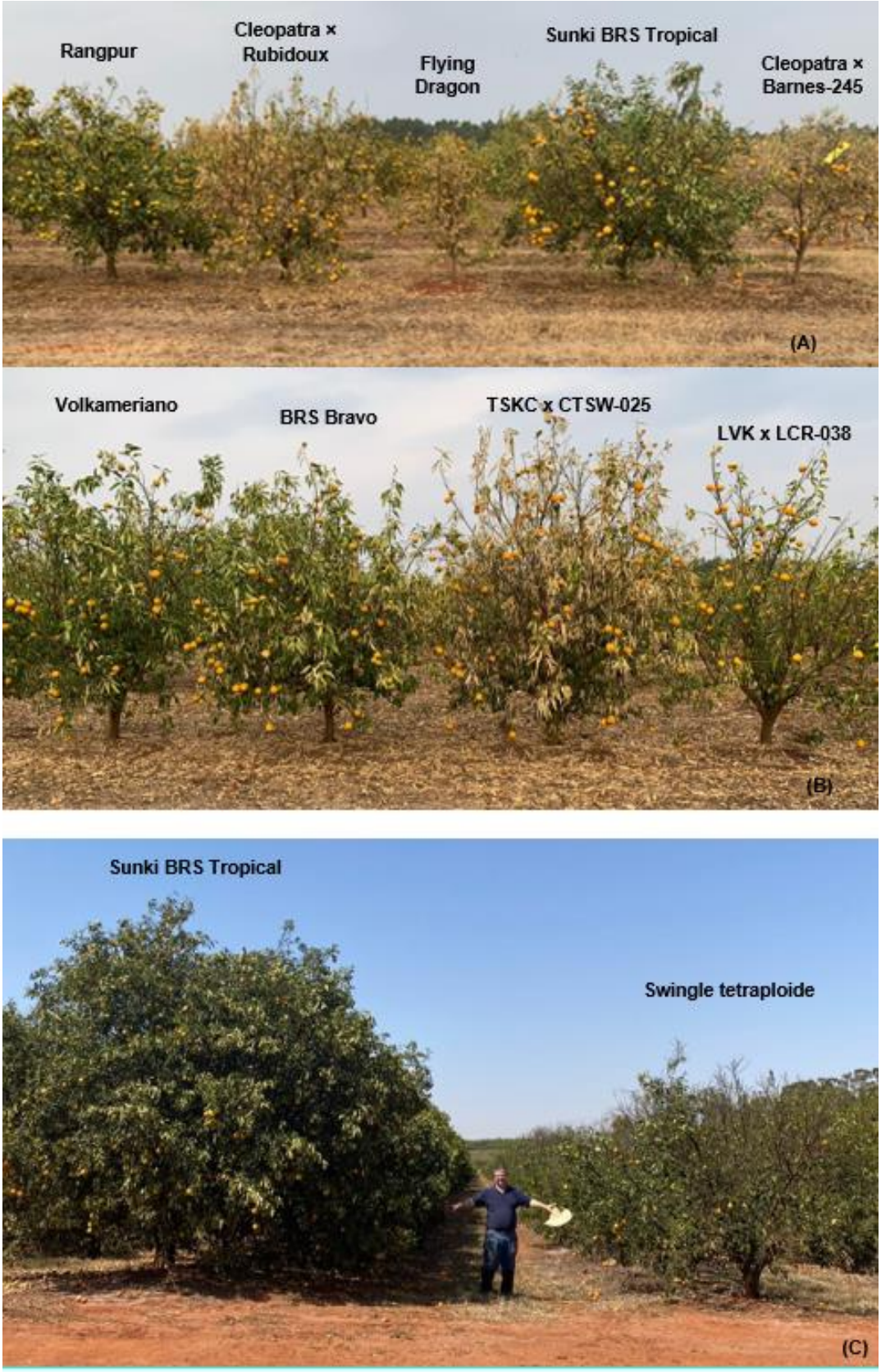


Figura 1. Comportamiento diferenciado de los citricultores ante la sequía extrema. (A y B) Comparación de naranja Pera sobre diferentes patrones, árboles de cuatro años de edad en Bebedouro, Sao Paulo (Brasil), octubre de 2020. (C) Comparación de naranja Valencia sobre patrones Sunki BRS Tropical y citrumelo Swingle tetraploide, árboles de 10 años de edad en Onda Verde, Sao Paulo (Brasil), octubre 2020. Fotos: Eduardo Girardi (EMBRAPA, Brasil)

4. Patrones enanizantes

La reducción del tamaño de los árboles es un tema interesante en los programas de mejoramiento de cítricos siempre que no se afecte la producción, número medio de frutos y el rendimiento medio por árbol. El origen de este fenotipo parece ser debido a la menor conductancia hidráulica (mayor resistencia hidráulica) de los vasos xilemáticos que limita la capacidad del xilema para transportar agua a las hojas (Basile *et al*., 2003a,b; Solari *et al.,* 2006a,b; Nardini *et al.,* 2006). Además, en cítricos, la conductividad hidráulica de los patrones se ha relacionado directamente con la capacidad de crecimiento vegetativo de los árboles (Syvertsen y Graham, 1985; Iwasaki *et al.,* 2011).

Como consecuencia de la limitada conductividad hidráulica, durante períodos de alta evapotranspiración potencial, los potenciales hídricos del tallo y la hoja son menores para las variedades injertadas sobre patrones enanos que para aquellas sobre patrones vigorosos (Basile *et al*., 2003a,b; Gonçalves *et al.,* 2006). Esto, a su vez, provoca el cierre de los estomas para prevenir la cavitación en los vasos del xilema y daño del sistema hidráulico (Nardini y Salleo, 2000). La reducida conductancia estomática, regulada por el estado del agua, disminuye la tasa de asimilación fotosintética de CO_2, con efectos adversos sobre el crecimiento posterior de los brotes (Solari *et al*., 2006a). Esto unido al menor número de vasos xilemáticos registrado en patrones de cítricos enanizantes como el Flying Dragon (*Poncirus trifoliata* L. Raf var. monstrosa; Castle *et al*., 2010), limita el desarrollo del conjunto de la planta. Esta aptitud también se ha observado en otros híbridos de Poncirus fruto del programa de mejora del IVIA, como el FA-418 y FA-517 (Forner-Giner *et al.,* 2014). Todo ello, sin comprometer la productividad, eficiencia de rendimiento y la calidad de la cosecha, cuando se combinaron con variedades de naranja Navel y limón (Martínez-Cuenca *et al*., 2016; Legua *et al*., 2018; Castle *et al.,* 2010), por lo que los hace excelentes candidatos con claras ventajas para su uso en explotaciones con fines de cultivo intensivo con siembras más densas. En Brasil, los híbridos de mandarina Sunki × trifoliata Flying Dragon y otras citrandarinas se han destacado como patrones enanos de naranja Valencia, que exhiben un mayor potencial de tolerancia a la sequía en comparación con el parental Flying Dragon (Costa *et al*., 2021). También es de destacar que la calidad de los frutos y del zumo tiende a ser mayor para estos patrones enanizantes, cuya eficiencia de producción (kg de frutos por metro cúbico de copa) es significativamente mayor en comparación con los patrones vigorosos.

5. Efecto sobre el crecimiento de la planta

En condiciones de clima mediterráneo, la falta de agua en el cultivo de los cítricos es un factor limitante para el crecimiento de los frutos, en términos de peso fresco y número de frutos, dos parámetros que determinan el rendimiento del árbol. Otros estreses abióticos, como la presencia de suelos calizos o condiciones salinas (Simón-Grao *et al*., 2019), también pueden reducir ambos parámetros, por lo que un posible efecto combinado de otros estreses dependerá de los resultados de análisis del suelo.

Como tendencia general, condiciones de riego deficitario reducen el crecimiento de las plantas y los frutos, observándose plantas con menor volumen de copa y diámetro de fruto en árboles sometidos a riego deficitario. Este es el caso de mandarina Orogrande injertada sobre los dos

patrones más utilizados en la citricultura española (C. carrizo y FA-5, Primo-Capella *et al.,* 2023), con una reducción de volumen de copa en torno al 30% en ambos patrones. Esto, se ha relacionado con la reducción de la superficie foliar como un mecanismo adaptativo de la planta para prevenir la pérdida de agua debido a la transpiración bajo estrés abiótico (Gómez-Cadenas *et al*., 2003; Tudela *et al.,* 1992), y del crecimiento del tallo, que junto con el fruto es aparentemente más sensible al déficit hídrico que las hojas en Satsumas (Maotani *et al*., 1997).

El déficit hídrico parece no influir de igual manera en el tamaño del árbol según la edad de éste. El tamaño de la planta no se vio afectado por la reducción de aporte hídrico en árboles jóvenes de algunas variedades de limón, naranja y mandarina (Martínez-Cuenca *et al*., 2016; Legua *et al.,* 2018; Castle *et al*., 2010; Primo-Capella *et al.,* 2023), lo que sugiere que la fotosíntesis y la distribución de carbohidratos en la planta no se vieron alteradas, al menos a los niveles de riego controlado de esos ensayos. Al contrario, sí hubo reducción de copa en otras variedades de mandarinas y pomelos (Figueiredo *et al.,* 2005; Castel y Buj, 1990; Peng y Rabe, 1998). Por otro lado, es común que a medida que los árboles crecen, las necesidades de fotoasimilados también crezcan y el RD ocasione un menor volumen de copa al tener restringidas las necesidades hídricas de la planta. El contenido de carbohidratos en las hojas y, en consecuencia, el desequilibrio fuente:sumidero, regula fuertemente el CO_2, y la acumulación de azúcar en las hojas es la señal que regula el mecanismo de retroalimentación para estimular la fotosíntesis (Iglesias *et al.*, 2002). Esta respuesta de las plantas tratadas con riego poco controlado también se ha descrito en otros cultivos como una respuesta adaptativa al estrés hídrico y salino, a pesar de los procesos de deshidratación. La reducción de AN (tasa fotosintética) relacionada con déficit hídrico fueron mucho menores en FA-5 (patrones *C. macrophylla* y *P. trifoliata*, Simon-Grao *et al*., 2019) o en algunas citrandarinas e híbridos de Flying Dragon (Gigardi et al., 2021) que en sus parentales y se relacionaron con la regulación hormonal bajo estrés hídrico, especialmente la inducción de ácido abscísico en raíces y hojas (Gómez-Cadenas *et al*., 1996).

Ante una misma variedad (Tabla 2), el patrón puede influir en la respuesta del conjunto de la planta al déficit hídrico. En concreto, plantas de naranja Valencia injertadas sobre los patrones FA-5 y mandarino Cleopatra (MC) presentan mayor contenido relativo de agua en las hojas (RWC) que sobre *P. trifoliata* (PT). Así, para evitar una pérdida de agua por transpiración, este último patrón sufre una regulación estomática más fuerte que los primeros. Y por la misma razón, la tasa fotosintética de las plantas injertadas sobre PT fue comparativamente menor a la de FA-5 y MC tras 20 días bajo condiciones de estrés hídrico (Rodriguez-Gamir *et al.,* 2010).

Tabla 2. Parámetros fisiológicos medidos en plantones de naranja Valencia injertados sobre los patrones *Poncirus trifoliata* (PT), mandarino Cleopatra (MC) y Forner-Alcaide 5 (FA-5). RWC: Contenido relativo de agua en la hoja; gs: conductancia estomática; A_N: tasa fotosintética; WUE: Eficiencia de uso del agua; Ct: control; DH: estrés hídrico

	RWC hoja (%)		**gs (mmol m^{-2} s^{-1})**		**A_N (µmol m^{-2} s^{-1})**		**WUE (mmol)**	
	Ct	**DH**	**Ct**	**DH**	**Ct**	**DH**	**Ct**	**DH**
V/PT	90,3	15,96b	84,14a	27,7b	6,82a	0,49c	4,57	1,58c
V/CM	89,1	70,85a	49,81b	26,83b	4,05b	0,91b	3,68	3,03b
V/FA-5	93,4	79,55a	65,79ab	38,71a	5,62ab	2,31a	4,68	4,62a

Fuente: Rodriguez-Gamir et al., (2010)

6. Efecto sobre la producción y la calidad de la fruta

Similar al desarrollo del árbol, las condiciones de riego deficitario reducen el crecimiento de los frutos. Algunos autores han descrito una estrecha dependencia entre el peso fresco (PF) de los frutos, número de frutos y el sistema de riego, al observar rendimientos más altos (relación positiva entre el rendimiento, el PF de los frutos y el número de frutos) en riego por goteo subterráneo en comparación con superficial (Montaña *et al*., 2005). El rendimiento del cultivo también será consecuencia del régimen hídrico aplicado y del estado fenológico de la planta. Así, se ha visto que la modalidad 100-40% de ETc (aplicación del 100% ETC en estados fenológicos más críticos para el árbol y reducción al 40% en los menos demandantes) en árboles de clementina de Nules afecta negativamente al rendimiento de las plantas en comparación con riego normal; mientras que, el riego con 70% de ETc afecta el peso fresco de los frutos, pero no el número de frutos por árbol, de manera que esta práctica apenas reduce el rendimiento de los árboles (Montaña *et al*., 2005). Sin embargo, Garcia-Tejero *et al.,* (2010) encontraron un menor rendimiento en clementina Nules al reducir el suministro de agua y aumentar el déficit hídrico.

Aquellos parámetros de calidad de los frutos también pueden verse afectados por el estrés abiótico, siendo el suministro de agua uno de los factores más restrictivos. De hecho, el control del estado hídrico del suelo puede ocasionar diferencias en el momento de maduración de los frutos, adelantando o favoreciendo retraso en la cosecha (Pérez-Pérez *et al*., 2009; Figura 2). Si el aporte es continuo y estable, los frutos son más homogéneos frente a riegos con mayores dosis y menor frecuencia.

Figura 2. Floración fuera de época (noviembre) de mandarina Orogrande como consecuencia de la aplicación de estrés hídrico iniciada el 1 de agosto. Foto: M. Dolores Molina-Nadal (Estación Experimental Agraria-Carcaixent, Consellería Agricultura, Valencia)

En términos generales, parámetros físicos como el diámetro del fruto y la distribución de calibres, son los más influenciados por este tipo de estrés, con valores menores bajo RD. Otros rasgos como el porcentaje de piel (mayor para RD) y el porcentaje de zumo (menor para RD), también dependen del contenido de agua de la planta y de los compuestos predominantes en las células de estas fracciones del fruto.

El espesor de la piel se ve menos afectado por el RD, lo que sugiere que el desarrollo celular en esta parte del fruto es más capaz de contrarrestar el bajo nivel de irrigación que las células de la parte interna de la fruta. Esto está respaldado por trabajos previos realizados en árboles de clementina de Nules sometidos a regímenes de 100-40% ETc o 70% ETc DI (Montaña *et al*., 2005), naranja Salustiana (Castel y Buj, 1990) y mandarina Satsuma (Peng y Rabe *et al.,* 1998).

Se ha visto relación directa entre el estado hídrico del árbol y la incidencia de rajado del fruto, desorden fisiológico causado por la presión de la expansión de la pulpa, que provoca el agrietamiento de la corteza y pérdidas, por tanto, del valor comercial de la fruta (hasta 30% de la producción en mandarinas Ellendale y Nova, según Rabe *et al*. 1990; Barry y Bower 1997). Otros factores como estado nutricional, temperatura, ET, precipitaciones, textura y humedad del suelo, pueden aumentar su incidencia. En concreto, se han encontrado mayores índices de rajado en árboles con desórdenes nutricionales (niveles bajos de calcio y potasio, pero altos de fósforo), unido a condiciones climáticas cálidas y húmedas, suministro de agua irregular y suelos pesados (Cronje y Stander, 2013). Mesejo *et al.* (2016) encontraron una estrecha relación entre rajado y la textura del suelo, positivamente correlacionada con porcentajes de arena e inversamente con los de arcilla y limo. En suelos con 85% de arena, ligeros cambios en la humedad del suelo debido a fluctuaciones de temperatura, ET o lluvias cambiaron la respuesta de crecimiento del tronco y del fruto durante unas pocas horas y aumentaron la incidencia rajado. Estos autores también describen una mayor incidencia en patrones cuyos pedúnculos de frutos tienen vasos xilemáticos más grandes, siendo mayor en citrange 'Carrizo' y 'C-35', que en 'FA-5', 'Cleopatra' y *P. trifoliata*. Y relativo a la variedad, la incidencia es mayor en naranjas, mandarinas y sus híbridos (Cronje y Stander, 2013), sobre todo en cultivares tipo Navel ya que la zona del ombligo es especialmente sensible a sufrir esta fisura. Además de afectar al rendimiento de la planta, también atrae insectos y patógenos que provocan la pudrición de los frutos y requiere un trabajo intenso para sanear los huertos.

Finalmente, en términos de calidad interna, la restricción hídrica aumenta el índice de acidez (IA) de los frutos. Este incremento varía entre el 20 y el 35% según patrones y campañas. En línea con el IA, el contenido de Sólidos Solubles Totales (SST) suele mostrar un comportamiento similar, aumentando de manera general entre un 10 y 20% bajo RD. El índice de madurez (IM), que se calcula como el ratio entre IA y SST, también se ve reducido por el RD. Montaña *et al*., (2005) observaron un incremento en SST y en IA bajo régimen hídrico restringido, que también se registró cuando se sometieron árboles de clemenules a RD continuo. En la misma línea, también se han informado valores de IA más altos en clementina con dosis de riego decrecientes (García-Tejero *et al*., 2010). Sin embargo, el RD 100-40% ETc generó menos SST y menor IA en relación con 100% ETc, mientras que la reducción del 70% ETc no mostró diferencias con los árboles controles (Montaña *et al*., 2005). Con todo esto se concluye que, un déficit hídrico moderado durante el llenado y maduración de la fruta aumenta el contenido de ácidos y sólidos solubles totales del zumo, y puede ser interesante para realizar cambios internos de calidad, tanto para fruta destinada a consumo en fresco como industria (Peng y Rave, 1998).

Bibliografía

Allario, T.; Brumos, J.; Colmenero-Flores, J.; Iglesias, D.J.; Pina, J. A.; Navarro, L.; Talon, M.; Ollitrault, P.; Morillon, R. (2013). Tetraploid Rangpur lime rootstock increases drought tolerance via enhanced constitutive root abscisic acid production. Plant, Cell & Environment, 36: 856–868. DOI: 10.1111/pce.12021.

Arbona, V.; Iglesias, D.J.; Jacas, J.; Primo-Millo, E.; Talon, M.; Gómez-Cadenas, A. (2005). Hydrogel substrate amendment alleviates drought effects on young citrus plants. Plant Soil, 270: 73–82.

Ballester, C.; Castel, J.; Intrigliolo, D. S.; Castel, J. R. (2011). Response of Clementina de Nules citrus trees to regulated deficit irrigation. Yield components and fruit composition. Agricultural Water Management, 98: 1027–1032.

Barry, G. H.; Bower J. P. (1997). Manipulation of fruit set and stylar-end fruit split in 'Nova' mandarin hybrid. Scientia Horticulturae, 70: 243–250.

Barry, G. H.; Castle, W. S.; Davies, F. S. (2004). Rootstocks and plant water relations affect sugar accumulation of citrus fruit via osmotic adjustment. Journal of the American Society for Horticultural Science, 129(6): 881–889.

Basile, B.; Marsal, J.; DeJong, T. M. (2003a). Daily shoot extension growth of peach trees growing on rootstocks that reduce scion growth to daily dynamics of stem water potential. Tree Physiology, 23: 695–704.

Basile, B.; Marsal, J.; Solari, L.; Tyree, M. T.; Bryla, D. R.; DeJong, T. M. (2003b). Hydraulic conductance of peach trees grafted on rootstocks with differing size-controlling potential. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 78: 768–774.

Castel, J. R.; Buj, A. (1990). Response of Salustiana oranges to high frequency deficit irrigation. Irrigation Science, 11: 121–127.

Castle, W. S.; Baldwin, J. C.; Muraro, R. P. (2010). Rootstocks and the performance and economic returns of 'Hamlin'sweet orange trees. HortScience, 45(6): 875–881.

Colmenero-Flores, J. M.; Arbona, V.; Morillon, R.; Gómez-Cadenas, A. (2020). Salinity and Water Deficit. En: The Genus Citrus. Woodhead Publishing. (pp. 291-309).

Costa, D. P.; Stuchi, E. S.; Girardi, E. A.; Gesteira, A. D. S.; Coelho Filho, M. A.; Ledo, C. D. S.; ... & Soares Filho, W. D. S. (2020). Hybrid rootstocks for Valencia sweet orange in rainfed cultivation under tropical savannah climate. Journal of Agricultural Science 12(11): 40-55.

Costa, D.P.; Stuchi, E.S.; Girardi, E. A.; Moreira, A. S.; da Silva Gesteira, A.; Coelho Filho, M. A.; ... & Soares Filho, W.S. (2021). Less is more: A hard way to get potential dwarfing hybrid rootstocks for Valencia sweet orange. Agriculture, 11(4); 354.

Cronje, P. J.; Stander, O. P.; Theron, K. I. (2013). Fruit splitting in citrus. Horticultural Reviews, 41: 177-200.

Cruse, R. R.; Wiegand, C. L.; Swanson, W. A. (1982). The Effects of Rainfall and Irrigation Management on Citrus Juice Quality in Texas. Journal of American Society of Horticultural Science 107(5): 767-770.

Enstone, D. E.; Peterson, C. A. (1998). Effects of exposure to humid air on epidermal viability and suberin deposition in maize (Zea mays L.) roots. Plant, Cell & Environment, 21(8): 837–844.

Fares, A.; Bayabil, H. K.; Zekri, M.; Mattos-Jr, D.; Awal, R. (2017). Potential climate change impacts on citrus water requirement across major producing areas in the world. Journal of Water and Climate Change, 8(4): 576-592.

Fereres, E.; Soriano, M. A. (2007). Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany, 58: 147–159.

Figueiredo, J. O.; Negri, J. D.; Mattos Jr., D.; Pio, R. M.; Laranjeira, F. F.; Garcia, V. P. (2005). Behavior of fourteen root¬stocks for eureka lemon (Citrus limon (L.) Burm. F.) cv. Km 47, in Araraquara, SP, Brazil. Revista Brasileira de Fruticultura, 27, 73–76.

Forner-Giner, M. A.; Rodriguez-Gamir, J.; Martinez-Alcantara, B.; Quiñones, A.; Iglesias, D. J.; Primo-Millo, E.; Forner, J. (2014). Performance of Navel orange trees grafted onto two new dwarfing rootstocks (Forner-Alcaide 517 and Forner-Alcaide 418). Science Horticulturae, 179: 376–387.

Forner-Giner, M. A.; Continella, A.; Grosser, J. W. (2020). Citrus rootstock breeding and selection. En: A. Gentile; S. La Malfa; Z. Deng (Eds.), The citrus genome (pp. 49–74). Springer.

García-Sánchez, F.; Carvajal, M.; Porras, I.; Botıa, P.; Martínez, V. (2003). Effects of salinity and rate of irrigation on yield, fruit quality and mineral composition of 'Fino 49'lemon. European Journal of Agronomy, 19(3): 427–437.

García-Tejero, I.; Romero-Vicente, R; Jiménez-Bocanegra, J. A.; Martínez-García, G.; Durán-Zuazo, V. H.; Muriel-Fernández, J. L. (2010). Response of citrus trees to deficit irrigation during different phenological periods in relation to yield, fruit quality, and water productivity. Agricultural Water Management, 97: 689–699.

Girardi, E. A.; Ayres, A. J.; Girotto, L. F.; Peña, L. (2021). Tree growth and production of rainfed Valencia sweet orange grafted onto trifoliate orange hybrid rootstocks under Aw climate. Agronomy, 11(12): 2533.

Gómez-Cadenas, A.; Tadeo, F. R.; Talon, M.; Primo-Millo, E. (1996). Leaf abscission induced by ethylene in water-stressed intact seedlings of Cleopatra mandarin requires previous abscisic acid accumulation in roots. Plant Physiology, 112(1): 401–408.

Gómez-Cadenas, A.; Iglesias, D. J.; Arbona, V.; Colmenero-Flores, J. M.; Primo-Millo, E.; Talon, M. (2003). Physiological and molecular responses of citrus to salinity. Recent research developments in plant molecular biology, 1(2): 281–298.

Gonçalves, B.; Moutinho-Pereira, J.; Santos, A.; Silva, A. P.; Bacelar, E.; Correia, C.; Rosa, E. (2006). Scion–rootstock interaction affects the physiology and fruit quality of sweet cherry. Tree Physiology, 26: 93–104.

González-Altozano, P.; Castel, J. R. (1999). Regulated deficit irrigation in 'Clementina de Nules' citrus trees. I: yield and fruit quality effects. Journal of Horticultural Science and Biotechnology, 74: 706–713.

González Altozano, P.; Castel, J. R. (2003). Riego deficitario controlado en'Clementina de Nules'. II. Efectos sobre el crecimiento vegetativo. Spanish Journal of Agricultural Research, 1(2): 93–101.

Huang, X. M.; Huang, H. B.; Gao, F. F. (2000). The growth potential generated in citrus fruit under water stress and its relevant mechanisms. Scientia Horticulturae, 83(3-4): 227–240.

Iglesias, D.J.; Lliso, I.; Tadeo, F.R.; Talon, M. (2002). Regulation of photosynthesis through source: sink imbalance in citrus is mediated by carbohydrate content in leaves. Physiologia Plantarum, 116(4): 563–572.

Iwasaki, M.; Fukamachi, H.; Satoh, K.; Nesumi, H.; Yoshioka, T. (2011). Development of tree vigor prediction method at an early stage based on stem hydraulic conductance of seedlings in citrus rootstocks. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science 80: 390–395.

Legua, P.; Martinez-Cuenca, M. R.; Bellver, R.; Forner-Giner, M. Á. (2018). Rootstock's and scion's impact on lemon quality in southeast Spain. International Agrophysics, 32(3).

López-Climent, M. F.; Arbona, V.; Pérez-Clemente, R. M.; Gómez-Cadenas, A. (2008). Relationship between salt tolerance and photosynthetic machinery performance in citrus. Environmental and Experimental Botany, 62(2): 176–184.

Mahouachi, J.; Gómez-Cadenas, A.; Primo-Millo, E.; Talon, M. (2005). Antagonistic changes between abscisic acid and gibberellins in citrus fruits subjected to a series of different water conditions. Journal of Plant Growth Regulation, 24: 179–187.

Maotani, T.; Machida, Y.; Yamatsu, K. (1977). Studies on Leaf Water Stress in Fruit Trees VI. Effect of leaf water potential on growth of satsuma mandarin (Citrus unshiu MARC.) Trees. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 45(4): 329-334.

Martínez-Cuenca, M. R.; Primo-Capella, A.; Forner-Giner, M. A. (2016). Influence of rootstock on Citrus tree growth: effects on photosynthesis and carbohydrate distribution, plant size, yield, fruit quality, and dwarfing genotypes. Plant Growth, 16: 107.

Mesejo Conejos, C.; Reig Valor, C.; Martinez Fuentes, A.; Gambetta, G.; Gravina Telechea, A.; Agustí Fonfría, M. (2016). Tree water status influences fruit splitting in Citrus. Scientia Horticulturae, 209: 96-104.

Montaña, C.; Carot, M.; Quinones, A.; Martínez-Alcántara, B.; Primo-Millo, E.; Legaz, F. (2005). Riego deficitario en goteo superficial y subterráneo. Vida Rural, 210: 40–44.

Nardini, A.; Gasco, A.; Raimondo, F.; Gortan, E.; Lo Gullo, M. A.; Caruso, T.; Salleo, S. (2006). Is rootstock-induced dwarfing in olive an effect of reduced plant hydraulic efficiency. Tree Physiology, 26: 1137–1144.

Nardini, A.; Salleo, S. (2000). Limitation of stomatal conductance by hydraulic traits: sensing or preventing xylem cavitation? Trees, 15: 14–24.

Navarro, J. M.; Pérez-Pérez, J. G.; Romero, P.; Botía, P. (2010). Analysis of the changes in quality in mandarin fruit, produced by deficit irrigation treatments. Food Chemistry, 119(4): 1591–1596.

Ortuño, M. F.; Alarcón, J. J.; Nicolás, E.; Torrecillas, A. (2004). Interpreting trunk diameter changes in young lemon trees under deficit irrigation. Plant Science, 167(2): 275–280.

Pedroso, F. K. J. V.; Prudente, D. A.; Carolina, A.; Bueno, R.; Machado, E. C.; Ribeiro, R. V. (2014). Drought tolerance in citrus trees is enhanced by rootstock-dependent changes in root growth and carbohydrate availability. Environmental and Experimental Botany, 101: 26–35.

Peng, Y. H.; Rabe, E. (1998). Effect of differing irrigation regimes on fruit quality, yield, fruit size and net CO_2 assimilation of 'Mihowase' satsuma. Journal of Horticultural Science of Biotechnology, 73(2): 229–234.

Pérez-Pérez, J. G.; Castillo, I. P.; García-Lidón, A.; Botia, P.; García-Sánchez, F. (2005). Fino lemon clones compared with the lemon varieties Eureka and Lisbon on two rootstocks in Murcia (Spain). Scientia Horticulturae, 106(4): 530–538.

Pérez-Pérez, J. G., Romero, P., Navarro, J. M., Botía, P. (2008). Response of sweet orange cv 'Lane late'to deficit irrigation in two rootstocks. I: water relations, leaf gas exchange and vegetative growth. Irrigation Science, 26(5): 415–425.

Pérez-Pérez, J. G.; Robles, J. M.; Botía, P. (2009). Influence of deficit irrigation in phase III of fruit growth on fruit quality in 'Lane Late' sweet orange. Agricultural Water Management, 96: 969–974.

Pestana, M.; de Varennes, A.; Abadía, J.; Faria, E. A. (2005). Differential tolerance to iron deficiency of citrus rootstocks grown in nutrient solution. Scientia Horticulturae, 104(1): 25–36.

Potters, G.; Pasternak, T. P.; Guisez, Y.; Palme, K. J.; Jansen, M. A. (2007). Stress-induced morphogenic responses: growing out of trouble?. Trends in Plant Science, 12(3): 98–105.

Primo-Capella, A.; Molina-Nadal, M. D.; Catalá-Senent, L.; de Miguel-Moreno, A.; Forner-Giner, M. Á.; Martínez-Cuenca, M. R. (2023). Response to deficit irrigation of 'Orogrande' mandarin grafted onto different citrus rootstocks in Spain. Horticulturae, 10(1): 37.

Quiñones, A.; Martínez-Alcántara, B.; Legaz, F. (2007). Influence of irrigation system and fertilization management on seasonal distribution of N in the soil profile and on N-uptake by citrus trees. Agriculture, Ecosystems & Environment, 122(3): 399–409.

Rabe, E.; Van Rensburg, P.J.J; Van Der Walt H.; Bower. J. (1990). Factors influencing preharvest fruit splitting in Ellendale (C. reticulata). HortScience 25(9).

Ruiz Sánchez, M. C.; Domingo, R.; Castel, J. R. (2010). Deficit irrigation in fruit trees and vines in Spain: a review. Spanish Journal of Agricultural Research, 8(S2): S5–S20.

Rodríguez-Gamir, J.; Primo-Millo, E.; Forner, J. B.; Forner-Giner, M. A. (2010). Citrus rootstock responses to water stress. Scientia Horticulturae, 126(2): 95–102.

Savé, R.; Biel, C.; Domingo, R.; Ruiz-Sánchez, M. C.; Torrecillas, A. (1995). Some physiological and morphological characteristics of citrus plants for drought resistance. Plant Science, 110(2): 167–172.

Shukla, N.; Awasthi, R.P.; Rawat, L.; Kumar, J. (2012). Biochemical and physiological responses of rice (Oryza sativa L.) as influenced by Trichoderma harzianum under drought stress. Plant Physiology and Biochemistry, 54: 78–88. DOI: 10.1016/j.plaphy.2012.02.001.

Simón-Grao, S.; Nieves, M.; Cámara-Zapata, J. M.; Martínez-Nicolás, J. J.; Rivero, R. M.; Fernández-Zapata, J. C.; García-Sánchez, F. (2019). The Forner Alcaide nº 5 citrus genotype shows a different physiological response to the excess of boron in the irrigation water in relation to its two genotype progenitors. Scientia Horticulturae, 245: 19–28.

Solari, L.I.; Johnson, S.; DeJong, T. M. (2006a). Relationship of water status to vegetative growth and leaf gas exchange of peach (Prunus persica) trees on different rootstocks. Tree Physiology, 26: 1333–1341.

Solari, L. I.; Johnson, S.; DeJong, T. M. (2006b). Hydraulic conductance characteristics of peach (Prunus persica) trees on different rootstocks are related to biomass production and distribution. Tree Physiology, 26: 1343–1350.

Syvertsen, J. P.; Graham, J. H. (1985). Hydraulic conductivity of roots, mineral nutrition and leaf gas exchange of citrus rootstocks. Journal of American Society of Horticultural Science, 110: 865–869.

Spanish Ministry of Agriculture, Fisheries, Food and Environment (MAGRAMA). (2022). https://www.mapa.gob.es/es/default.aspx/ Acceso: 21 February 2024.

Spanish Meteorology Statal Agency (AEMET). (2022). https://www.aemet.es/es/portada / Acceso: 21 February 2024.

Treeby, M. T.; Henrioda, R. E.; Bevington, H. B.; Milne, D. J.; Storey, R. (2007). Irrigation management and rootstock effects on navel orange [*Citrus sinensis* (L.) Osbeck] fruit quality. Agricultural Water Management, 91(1–3): 24–32.

Tudela, D.; Primo-Millo, E. (1992). 1-Aminocyclopropane-1-carboxylic acid transported from roots to shoots promotes leaf abscission in Cleopatra mandarin (Citrus reshni Hort. ex Tan.) seedlings rehydrated after water stress. Plant Physiology, 100(1): 131–137.

Zhang, S. Q.; Outlaw Jr, W. H. (2001). Abscisic acid introduced into the transpiration stream accumulates in the guard-cell apoplast and causes stomatal closure. Plant, Cell & Environment, 24(10): 1045–1054

4.7. El olivar en un cambio de época: adaptación a condiciones limitantes de agua y respuesta varietal al riego

Luis Rallo[1*], Diego Cabello[1], Raúl de la Rosa[2] e Ignacio Lorite[3]

[1]*Departamento de Agronomía, Universidad de Córdoba (UCO)*
2 Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC)
[3] *Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA)*

* lrallo@uco.es

Índice

1. Introducción: el olivar en un cambio de época 452
2. Características del olivar tradicional 452
3. El nuevo olivar 453
4. Adaptación a condiciones limitantes de agua 456
5. El Riego 457
6. Variedades 459
7. Conclusión 459

Resumen

El olivar es uno de los cultivos frutales más plantado en el mundo mediterráneo desde su domesticación hace alrededor de 6.000 años. La selección empírica local en una especie de gran diversidad genética y de fácil propagación vegetativa ha proporcionado un inmenso número de variedades adaptadas a esta región de limitada pluviometría, veranos calurosos e inviernos suaves. Además, los olivos han sido originalmente cultivados en suelos poco profundos y terrenos inclinados, en zonas no aptas para otros cultivos. Esta milenaria olivicultura ha conformado el paisaje agrario de esta extensa región. Durante milenios, esta tecnología oleícola de base empírica local ha permanecido inalterable1. Se trata en suma de un olivar extensivo de baja productividad, empleando abundante mano de obra para su recolección y que ha ocupado una notable superficie en los países mediterráneos. La domesticación del olivo en estos ambientes con recursos hídricos muy limitados ha hecho que este cultivo esté especialmente adaptado a condiciones limitantes de agua. Desde después de la segunda Guerra Mundial, el cultivo del olivo se ha transformado radicalmente. Del olivar de secano tradicional se ha pasado progresivamente a un olivar de alta y muy alta densidad de plantación, con un muy eficiente riego deficitario localizado, y de alta productividad recogido mecánicamente con cosechadoras cabalgadoras a las que se adaptan escasas variedades tradicionales, lo que ha urgido la obtención de otras nuevas. Este olivar, surgido tras la emigración rural en comarcas oleícolas, ha sido impulsado por un creciente desarrollo científico y tecnológico. Los nuevos olivares han

requerido importantes recursos financieros proporcionados inicialmente por la ayuda a la producción de la PAC. En la actualidad, fondos de inversión y entidades financieras han apostado por el olivar en seto, conocido como superintensivo, debido a su elevada rentabilidad y a la creciente demanda del aceite de oliva y de la aceituna de mesa en el mercado global.

1. Introducción: el olivar en un cambio de época

Los orígenes del olivo se remontan al Mediterráneo oriental hace más de 6.000 años, con una extensión hacia el norte de África, la Península Ibérica y el resto de la cuenca, regiones caracterizadas por veranos calurosos y escasas precipitaciones. Además, los olivos han sido originalmente cultivados en suelos poco profundos y terrenos inclinados, en zonas no aptas para otros cultivos debido a la falta de recursos hídricos y a las limitaciones del suelo. La domesticación del olivo en estos ambientes con recursos hídricos muy limitados ha hecho que este cultivo esté especialmente adaptado a condiciones limitantes de agua. Se trata de un olivar extensivo de baja productividad, empleando abundante mano de obra para su recolección y que ha ocupado una notable superficie en los países mediterráneos (Foxhall, 2007).

Tras la Segunda Guerra Mundial, el cultivo del olivo se ha ido transformando radicalmente. Del olivar de secano tradicional se ha pasado progresivamente a un olivar de alta y muy alta densidad de plantación, cosechado mecánicamente, con un muy eficiente riego deficitario localizado, y de alta productividad. Este olivar, surgido tras la emigración rural en comarcas oleícolas, ha sido impulsado por un creciente desarrollo científico y tecnológico. Los nuevos olivares han requerido importantes recursos financieros proporcionados inicialmente por la ayuda a la producción de la PAC. En la actualidad, fondos de inversión y entidades financieras han apostado por el olivar en seto debido a su elevada rentabilidad y a la creciente demanda del aceite de oliva y de la aceituna de mesa en el mercado global. Dicho, aumento de la demanda ha estado asociada a los efectos saludables y al aprecio culinario de ambos alimentos. Además, esta profunda transformación ha estado acompañada de un cambio de actores. Los olivareros tradicionales están siendo progresivamente reemplazados por empresas mercantiles de mayor dimensión, empleando estrategias transversales de la granja a la mesa, que comercializan en la actualidad la mayor cuota de mercado. España es hoy el país protagonista de este cambio.

El presente artículo analiza sucintamente qué puede aportar el sistema de ciencia y tecnología al uso del agua y la elección varietal, así como los factores más determinantes de la rentabilidad del olivar y de la calidad de sus productos, todo ello en un horizonte de escasez de agua y cambio climático.

2. Características del olivar tradicional

Varias características han conformado al olivar tradicional (Figura 1). La selección empírica local de individuos sobresalientes, que se han propagado vegetativamente, es decir que se clonaron, originaron las numerosas variedades tradicionales adaptadas al cultivo tradicional en sus regiones de origen. El olivo está muy bien adaptado al clima mediterráneo, caracterizado por una prolongada sequía estival, una irregular pluviometría durante el resto del año y un invierno

relativamente frío. El cultivo en secano ha sido la norma en la mayoría de estas plantaciones. Los olivares tradicionales han estado constituidos por árboles longevos, de notable tamaño, distanciados entre sí y cultivados en piedemonte en la mayoría de los casos. Su monocultivo ha sido y es habitual en muchas zonas. Las técnicas de cultivo se han basado generalmente en un empirismo local multisecular. En consecuencia, la productividad por hectárea ha sido baja y la creciente demanda histórica de aceite de oliva y de aceitunas de mesa ha sido atendida mediante el aumento de la superficie plantada. De este modo, los sucesivos olivares se plantaron en los suelos disponibles, progresivamente más pobres y frágiles. Finalmente, la recolección, que es aún manual en muchas plantaciones, ha representado y aún hoy supone la mayor demanda anual de mano de obra en numerosas comarcas olivareras, siendo por tanto la fuente de trabajo fundamental para sus gentes durante los 2-3 meses que dura la recolección.

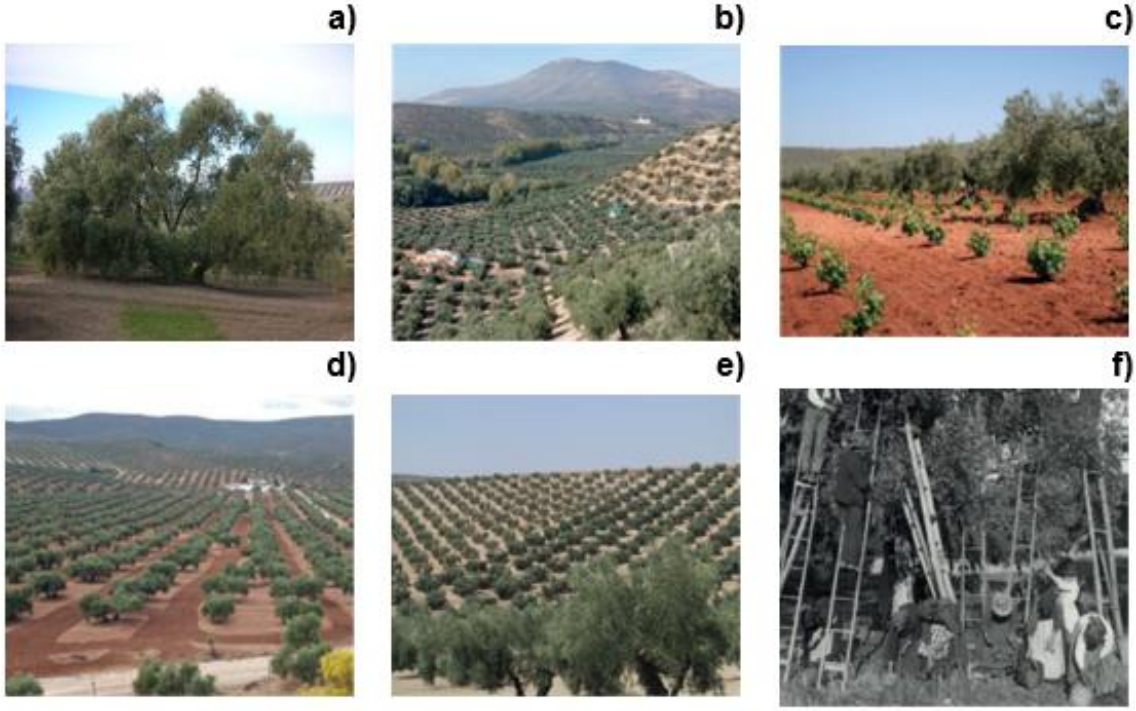


Figura 1. La diversidad del paisaje olivarero tradicional es infinita. Un ramillete de casos lo ilustran. Olivo centenario (a), olivar en pendiente (b), asociación olivar y viñedo (c) olivar en campiña (d), olivar en secano y riego (e), y recolección manual (f). Imagen 1f cortesía de los herederos de Antonio Cezar d'Abrunhoza, Portugal (1930)

3. El nuevo olivar

En España, la emigración rural a las urbes a partir de mitad de la década de los 50 del siglo XX requería olivares productivos, mecanizados y más exigentes en capital. En torno a 1970, la baja productividad de los olivares y la competencia con otros aceites vegetales procedentes de cultivos anuales, cuyos costes de producción y precio de mercado eran mucho menores, desencadenaron una profunda crisis en el sector oleícola. El programa experimental de Reconversión y Mejora Productiva del Olivar PRMPO (1973-86) sentó las bases de una nueva olivicultura basada en la mecanización de la recolección y en el aumento de la productividad y de la precocidad de entrada en producción.

Los cambios acumulados desde entonces han originado esta olivicultura. Los nuevos olivares son de entrada en producción más precoz y de longevidad menor, con mayor densidad de plantación y con árboles de menor porte y más adaptados a la recolección mecánica. Se han implementado Buenas Prácticas Agrícolas (BPA) para limitar la erosión del suelo, la contaminación ambiental y, al tiempo, mejorar la calidad de las producciones. Por otro lado, las labores de cultivo se han simplificado y mecanizado, en particular la recolección y la poda, las dos labores más exigentes en mano de obra. También la productividad ha aumentado de la mano del riego y de mayores densidades de plantación (Figura 2). Hoy día las variedades tradicionales son remplazadas por las escasas variedades multiplicadas por los viveros comerciales. Al mismo tiempo se inicia por primera vez la mejora genética sistemática. Finalmente, el aceite de oliva y la aceituna de mesa se acreditan progresivamente como alimentos saludables y su consumo mundial se expande gradualmente.

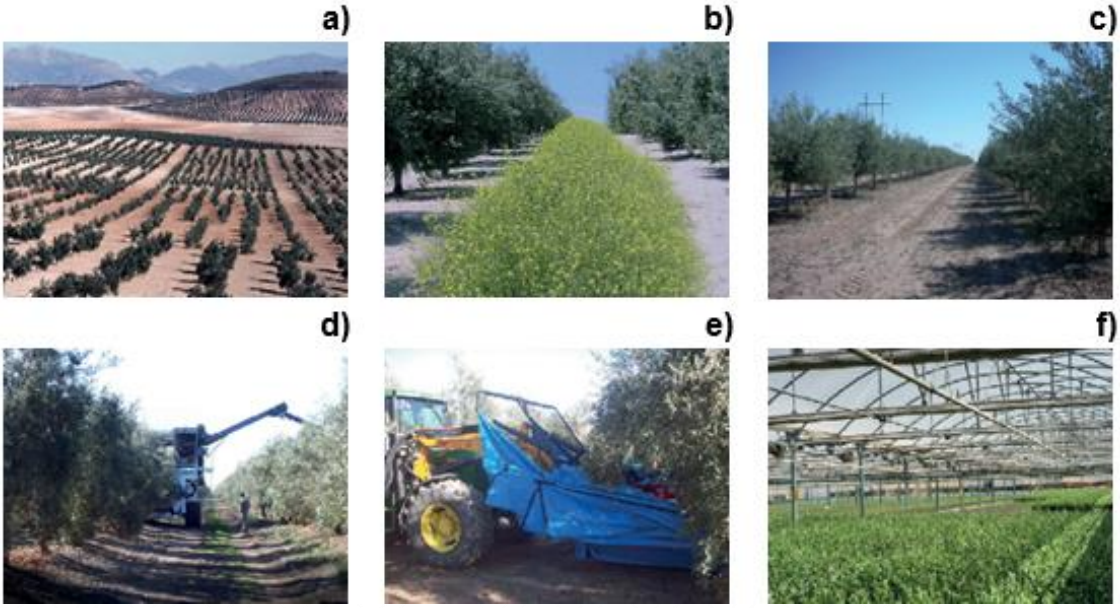


Figura 2. El Plan de Reconversión y Mejora Productiva del Olivar (PRMPO, 1973-1986) sienta las bases experimentales de la nueva olivicultura. Ensayos de densidades: (a), ensayo de densidades en Mancha Real (Pastor et al., 1993) promueven nuevas plantaciones de mayor densidad en secano (b) y en riego intensivo (c) y de alta densidad (d), compatibles con la recolección mecánica (e). Se inicia además una potente industria de viveros (f).

La entrada de España en la UE en 1986 y una OCM que primaba la producción desencadenaron la expansión acelerada del riego por goteo y mayores densidades de plantación, buscando un incremento rápido de la productividad para una olivicultura exigente en capital. En 1993, por iniciativa de Agromillora (un vivero productor de olivos) nace el olivar en seto cosechado con vendimiadoras cabalgadoras. Intuición y ambición impulsan este nuevo sistema de muy alta densidad (>600 árboles por ha en secano y >1.500 árboles por ha en riego), de copa continua estrecha (<1,5m) y de altura limitada (2,8 - 3m), con más del 20% de porosidad a la radiación solar. Este nuevo olivar, popularizado como superintensivo, es de muy alta y precoz productividad, y cosechable con máquinas cabalgadoras a bajo coste. Inicialmente se basó en la variedad Arbequina de muy precoz entrada en producción (Figura 3), pero pronto se hizo evidente la necesidad de nuevas variedades.

La evolución de la superficie del olivar y de las producciones de aceite de oliva y aceituna de mesa desde 1970 hasta 1986 (PRMPO); desde 1986 (ingreso de España en la UE) hasta 2000 (expansión del olivar intensivo y de alta densidad); desde 2000 hasta 2010 (expansión inicial del seto estrecho) y desde 2010 (experimentación general y expansión progresiva de los nuevos sistemas de plantación, con predominio creciente del superintensivo) se muestran en la Tabla 1. Datos posteriores del MAPA indican el predominio creciente del olivar en seto en las últimas plantaciones.

Tabla 1. Superficie de olivar y producción de aceite de oliva, aceituna de mesa en España en 1969/70,1985/86,1999/00,2009/10 y 2019/20. Datos del Mapa indican un crecimiento dominante y progresivo del olivar superintensivo en el último quinquenio

Año	Superficie (ha x 1.000)			Producción (t x 1.000)	
	Almazara	Mesa	Total	Aceite	Aceituna
1969/70	2.235	122	2.537	434	86
1985/86	1.840	143	1.903	466	289
1999/00	2.057	174	2.231	955	331
2009/10	2.309	166	2.475	1.395	584
2019/20	2.620	114	2.734	1.120	460

Fuente: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación

La Tabla 2 recoge las características de las tres tipologías de olivar más importantes en España (tradicional, intensivo y superintensivo) tanto en secano como en riego.

Tabla 2. Tipologías de olivares

	Tradicional		Intensivo		Superintensivo	
Variable	**Secano (TS)**	**Riego (TR)**	**Secano (IS)**	**Riego (IR)**	**Secano (SIS)**	**Riego (SIR)**
Variedades	Diversas y locales		Pocas, de productividad alta y precocidad			
Densidad (olivos/ha)	17-300[y]	70-120	150-250	200-400	600-1.000	>1.200
Volumen (10^3 m^3/ ha)	6-9	11-13	8-10	12-15	4-6	6-7
Formación/ troncos	Variable y vaso (1-4)		Vaso (1)		Seto estrecho (1)	Seto estrecho (1)
Años hasta plena producción	10-15	8-10	6-8	5-7	4-5	3-4
Productividad plena producción[z] (t /ha)	1-5	5-10	4-6	8-10	4-6	>10
Años de producción	>100	>100	>40	>40	>20	>20
Calidad del aceite	Irregular y DOP[z]		Alta Calidad		Alta Calidad	
Recolección	Manual, vareo, vibradoras, suelos		Vibradoras tronco y estructuras de acopio		Cosechadoras cabalgadoras	

[y] *TS = Tradicional Secano, TI=Tradicional Riego, IS = Intensivo Secano, IR = Intensivo Riego, SIS=Superintensivo Secano, SIR=Superintensivo Riego.*

[y] *Según Pluviometría (200-800mm)*

[z] *DOP (Denominación de Origen Protegida).*

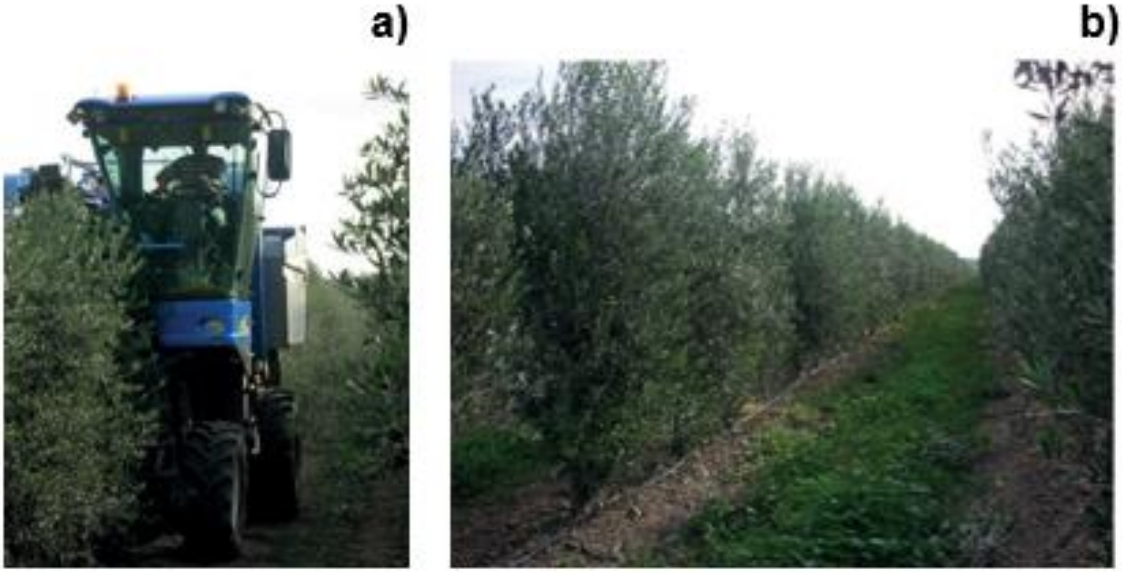


Figura 3. La recolección mecánica del olivo en continuo con vendimiadoras cabalgantes (a) y la adaptación casual de la variedad 'Arbequina' iniciaron el desarrollo de las primeras plantaciones de olivar superintensivo (b)

4. Adaptación a condiciones limitantes de agua

Los olivos afectados por el estrés hídrico reducen el contenido de agua y el potencial hídrico de sus tejidos, estableciendo un gradiente de potencial particularmente alto entre hojas y raíces, y deteniendo el crecimiento vegetativo del dosel foliar, pero no la actividad fotosintética y la transpiración.

Las hojas de olivo toleran un bajo potencial hídrico que destruiría la mayoría de los cultivos anuales y perennes. Por ello, están muy adaptadas a la sequía, ya que son hipostomáticas, lo que significa que los estomas solo están en el envés de la hoja, mientras que el haz es impermeable, implicando que la transpiración tiene lugar solo en el envés de la hoja. Además, las estomas están protegidos del exceso de radiación por los tricomas, y la hoja de olivo puede girar sobre su eje para reorientarse en un ángulo más vertical para evitar el exceso de radiación.

Un componente muy importante de la respuesta al estrés hídrico en olivos es el fenómeno fisiológico del control estomático de la transpiración. Las estomas se cierran cuando la diferencia de potencial hídrico entre las hojas y el suelo excede los límites requeridos para un funcionamiento adecuado del árbol. Esto permite que el olivo permanezca lo suficientemente hidratado como para mantener sus funciones fisiológicas, incluida la fotosíntesis, en condiciones de sequía. Esta regulación es muy eficaz con estrés hídrico de bajo a moderado, pero su eficacia disminuye con estrés hídrico alto. Además, cuando el olivo está sometido a un déficit hídrico, las estomas se abren más temprano cada día y permanecen abiertos durante períodos más cortos.

Otra característica de la adaptación del olivo a situaciones de escasa disponibilidad hídrica es la alta capacidad de transporte de agua a las hojas. El potencial hídrico entre las hojas y las raíces

es la fuerza impulsora que permite que el agua suba a las hojas, pero más allá de cierto límite, el aire podría entrar a través de las membranas del conducto, generando burbujas y causando embolismo. Para evitar estos procesos, el olivo reduce la conductividad hidráulica y si se incrementa el estrés, también reduce la transpiración para aliviar la tensión y evitar una mayor cavitación. Además, el olivo tiene los vasos del xilema de pequeño diámetro, lo que dificulta este fenómeno, y los vasos están interconectados, lo que permite que el agua circule a través de un vaso vecino que aún esté en funcionamiento.

Por otro lado, el sistema radical del olivo se desarrolla en capas superficiales del suelo para hacer un uso más eficiente del agua proporcionada por las lluvias poco frecuentes y ligeras. También es altamente plástico, adaptándose rápidamente a los cambios en el suministro de agua mediante la redistribución de las raíces activas en el suelo. La combinación de la capacidad del olivo para reducir el potencial hídrico y su extenso sistema radical aumenta su capacidad para resistir la sequía al aumentar la cantidad de agua extraíble del suelo.

Tabla 3. Nivel de adaptación a la falta de agua de las variedades de olivo a la sequía

Adaptación a la falta de agua	Cultivar	País
Alta	Chemlal de Kabiliè	Argelia
	Arauco	Argentina
	Salonenque	Francia
	Chaikidiki, Koroneiki	Grecia
	Souri = Sorani	Israel-Jordania-Líbano-Estado de Palestina-Siria-Turquía
	Carolea	Italia
	Nabili Baladi	Jordania
	Hauzia, Picholine Marroquí	Marruecos
	Galega Vulgar	Portugal
	Cornicabra, Hojiblanca	España
	Chemlali Sfax	Túnez
	Memecik	Turquía
Media	Sigoise	Argelia
	Picholine du Languedoc	Francia
	Anfisis = Konservolia, Mastoides	Grecia
	Coratina, Frantoio, Nocellara del Belice	Italia
Baja	Leccino	Italia
	Cobrançosa, Cordovil de Serpa	Portugal
	Picual	España
	Meski	Túnez

5. El Riego

Como anteriormente se comentó, el olivo ha sido tradicionalmente un cultivo de secano. Sin embargo, en la nueva olivicultura, el riego se ha convertido en el principal motor de la mejora de la productividad. Además, contribuyendo a esta mejora de la productividad y eficiencia en el uso del agua, datos recientes (ESYRCE, 2019) indican la utilización generalizada del riego por goteo (Figura 4a).

El cálculo del agua necesaria para lograr una productividad máxima del olivo se determina mediante la estimación de la evapotranspiración de referencia (ETo) a partir de datos proporcionados por estaciones agrometeorológicas (Figura 4b), del coeficiente de cultivo (Kc) en función del nivel de cobertura del suelo por la copa de los árboles, en función de las distancias de plantación y el estado de desarrollo del cultivo, y de un coeficiente reductor (kr) que tiene en cuenta el estado hídrico del cultivo. La respuesta de los olivos al riego para producción máxima y al riego de apoyo (Figura 4 c y d) ilustran la excepcional respuesta del olivo a cualquier cantidad de agua, cuestión fundamental en un horizonte de escasez de agua disponible. Con una correcta gestión del riego los olivares pueden alcanzar producciones que oscilan entre 8 t/ha de aceituna en densidades tradicionales de 100 plantas por hectárea, hasta 12-15 t/ha de aceituna en nuevas plantaciones con 300-400 olivos por hectárea y en olivares en setos estrechos y porosos (>1.500 árboles por hectárea).

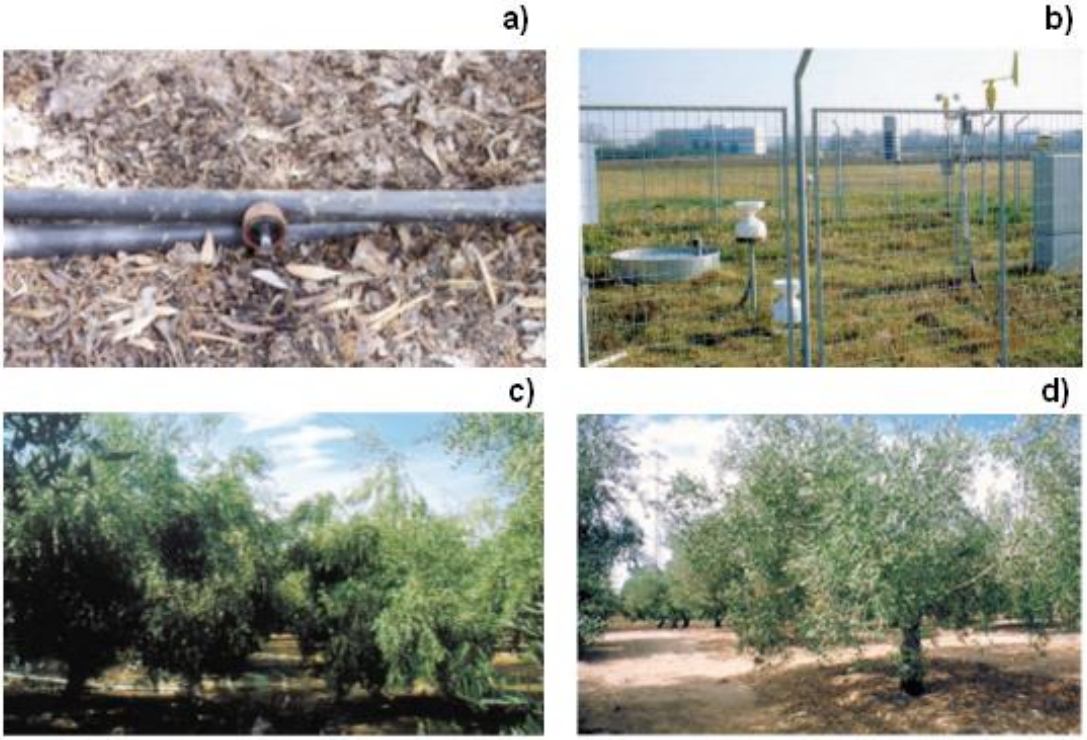


Figura 4. Riego del olivo por goteo (a), estación agrometeorológica de Alameda del Obispo (Córdoba) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia, ETo (b), respuesta del olivo a riego para productividad máxima (c) y para riego de apoyo (d).

Además, cabe esperar que las variedades más adaptadas a la falta de agua sean las que también tengan un mayor incremento de la producción al pasar del secano a un riego deficitario. Es lo que se denomina eficiencia en el uso del agua. Sin embargo, sería necesario realizar experimentos de campo para determinar las diferencias varietales en cuanto a dicha eficiencia en el uso del agua.

6. Variedades

La expansión global del olivar en seto con nuevas variedades y la implantación de estrategias de riego deficitario controlado para garantizar la disponibilidad de agua en los procesos críticos del ciclo reproductor del olivo están modificando aceleradamente la geografía del olivar.

De las variedades tradicionales solo Arbequina, Arbosana y Koroneiki son objeto de plantación en olivares en seto. A partir de mediados de los 80 del siglo XX, Agromillora Catalana, un vivero multinacional de olivo, inicia actividades de selección clonal en las anteriores variedades y algunos cruzamientos buscando nuevos materiales adaptados al nuevo sistema de plantación para su comercialización global.

En España, el primer programa sistemático de mejora por cruzamientos se inició en 1990 (Rallo, 1995) por la Universidad de Córdoba (UCO). Los cruzamientos se llevaron a cabo en las fincas Alameda del Obispo y Venta del Llano por concierto con el INIA. A partir de la creación del IFAPA (2003), este organismo autónomo de investigación, transferencia y formación de la Junta de Andalucía asume las funciones, bienes y servicios del INIA. El programa de mejora pasa a ser conjunto de la UCO y del IFAPA. Desde 1990 numerosas publicaciones de investigación y divulgación informan del desarrollo del Programa UCO-IFAPA que ha sido pionero en el desarrollo de la mejora genética del olivo en España. A partir de 2006 se han generado numerosos programas en los que la colaboración entre instituciones públicas y en consorcios público-privado se están generalizando.

Desde el registro de 'Sikitita' en 2009, más de 32 variedades han sido registradas conforme a la normativa de la UPOV y de la Unión Europea. En las publicaciones periódicas del MAPA se puede encontrar la relación de variedades comerciales, incluidas las protegidas conforme a la legislación reseñada. La tendencia a desarrollar nuevos programas de mejora también aparece en otros países. Sin embargo, a pesar de estos avances en la obtención de nuevas variedades, no hay un conocimiento preciso sobre la diferente adaptación de éstas a las condiciones de escasez de agua. Esta información será clave en el futuro del cultivo del olivo en seto, dada la expansión de este sistema de cultivo en secano, y por lo tanto nuevos estudios deben ser orientados a esta línea de investigación.

7. Conclusión

Por tanto, son imprescindibles redes experimentales centradas en tradicionales y nuevas variedades para analizar y modelizar la adaptación de la nueva geografía del olivar al cambio climático, y en especial a la falta de agua. En estos programas los procesos del ciclo reproductor bienal serán críticos para el comportamiento varietal.

En suma, se precisa una red experimental coordinada que incluya las nuevas variedades obtenidas para los olivares intensivos, de alta densidad y en seto procedentes de los programas de mejora en curso. La colaboración público-privada en el proceso de mejora puede anticipar información útil al sector previo al registro de las variedades. Es también el caso de las variedades tradicionales más importantes en los diferentes países oleícolas de la Red del Consejo Oleícola Internacional (COI) recogidas en la página web del COI. Recientemente el

acuerdo firmado entre el Gobierno de España y la FAO abre el camino a la integración progresiva de los países firmantes del Tratado Internacional para los Recursos Fitogenéticos para la Agricultura y la Alimentación (TIRFAA) en las futuras redes.

Agradecimientos

Los resultados presentados en este trabajo sintetizan la información de numerosas publicaciones llevadas a cabo por investigadores y tecnólogos del Instituto de Agricultura Sostenible (IAS-CSIC), el Centro IFAPA-Alameda del Obispo, y la Universidad de Córdoba (UCO). Diversas empresas privadas y organizaciones agrarias interprofesionales han colaborado con IAS-CSIC, IFAPA Y UCO en numerosos proyectos y con datos de infinidad de plantaciones que han determinado el cambio de época en el olivar liderado desde España.

Nuestro agradecimiento a todos.

Bibliografía

Agromillora Group. (2022. 14 de abril). La senda del azar. Un documental sobre la mayor revolución agrícola. [Video]. Youtube. https://www.youtube.com/watch?v=unuJImvQnDU

Barranco, D. Fernández-Escobar, R., Rallo, L. (Editores). (2017). El Cultivo del Olivo. 7ª Edición. 994 pp. Mundi-Prensa. Madrid. Un extenso tratado que engloba la geografía del olivar, su cultivo, la transformación y calidad del aceite de oliva y de la aceituna de mesa y su economía en 21 capítulos redactados por 59 autores.

Barranco, D. y Rallo, L. (2021). Del olivar tradicional al superintensivo: La senda del azar. Revista Campo.es [Online]. https://www.revistacampo.es/portada-app/del-olivar-tradicional-al-superintensivo-la-senda-del-azar/

De la Rosa, R. y León, L. (2023). Variedades para el olivar del futuro. Revista Mercacei [Online] https://www.mercacei.com/noticia/59902/dia-mundial-del-olivo-2023/variedades-para-el-olivar-del-futuro.html

De la Rosa, R., Belaj, A., y León, L. (2024). Situación actual y perspectivas del panorama varietal del olivo. Vida Rural Julio 2024 32-37. https://www.agronegocios.es/vida-rural/olivar/page/2/

EYSRCE, (2019) Encuesta sobre Superficies y Rendimientos Cultivos (ESYRCE). Encuesta de Marco de Áreas de España. (mapa.gob.es)

Foxhall, L. (2007). Olive Cultivation in Ancient Greece. 294 pp. Oxford University Press. Oxford New York

Grupo UCOLIVO. Universidad de Córdoba. (2023). ¿Cómo serán las variedades del futuro? Revista Mercacei [Online] https://www.mercacei.com/noticia/59874/dia-mundial-del-olivo-2023/como-seran-las-variedades-del-futuro.html

Guerrero, A. (1988). Nueva Olivicultura. 269 pp. Junta de Andalucía Mundi-Prensa. Madrid. Un libro recapitulativo del Programa de Reconversión y Mejora Productiva del Olivar (PMRPO) 1983-1986.

Orgaz, F., Fereres, E. Testi. (2019). Riego. En Barranco, D. Fernández-Escobar, R., Rallo, L. (Editores). El Cultivo del Olivo. 7ª Edición. Pp. 461- 490. Mundi-Prensa. Madrid.8º Edición.2024. En prensa

Pastor Muñoz-Cobo, M. (Editor). (2005). Cultivo del Olivo con Riego Localizado. 783 pp. Junta de Andalucía Mundi-Prensa. Una detallada guía para el uso racional del agua en el olivar presentada en 22 capítulos redactados por 20 autores

Rallo L. (1995). Selección y mejora genética del olivo en España. Olivae. 59: 46-53

Santos, C., Gabaldón-Leal C., Cruz-Blanco M., Porras R., León L., de la Rosa R., Belaj A., Lorite, I.J. (2019) El cultivo del olivo ante el cambio climático. Servifapa. Junta de Andalucía. https://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/ifapa/servifapa/registro-servifapa/fbba12f6-d2c9-4425-a7fc-5611619efbe2

BLOQUE V. PROCESADO

Mitigue la contaminación cruzada del agua de lavado de los productos frescos con

SmartWashSolutions

Pinpoint Process Control.

Mediante la combinación de revolucionarios potenciadores del lavado de alimentos que **aumentan la eficiencia y eficacia del cloro** con equipos que **controlan y supervisan con precisión la composición química del agua de lavado,** SmartWash Solutions® le permite **alcanzar el más alto nivel de seguridad alimentaria del sector.**

- **Elimina el 97% de los patógenos**
- **100 veces más eficaz para mitigar la contaminación**
- **Más de 40 centros de todo el mundo confían en él en más de 240 líneas de lavado**

PRESERVE LA REPUTACIÓN DE SU MARCA • EVITE COSTES DE RETIRADA
PROTEJA LA SALUD DE LOS CONSUMIDORES

Contáctenos para mejorar su programa de seguridad alimentaria

+31-1544-1290
es.smartwashsolutions.com

CIENCIA
INGENIERÍA
TECNOLOGÍA

5.1. Avances en la gestión del agua para el acondicionamiento de frutas y hortalizas en centrales hortofrutícolas y para el lavado de productos frescos cortados en las plantas de procesado

María Isabel Gil

Grupo de Microbiología y Calidad de Frutas y Hortalizas, CEBAS-CSIC

migil@cebas.csic.es

Índice

1. Usos del agua en el acondicionamiento de productos enteros y en el procesado de productos frescos cortados 466

2. Definiciones de tipos de agua empleada en la industria de productos vegetales 469

3. Implicaciones del agua en los riesgos microbiológicos 470

4. Gestión de la desinfección del agua durante el manejo poscosecha y procesado 471

5. Impacto medioambiental del agua de proceso y del agua residual 473

6. Consejos prácticos para optimizar la desinfección del agua de lavado en las centrales hortofrutícolas y en plantas de procesado de frutas y hortalizas 474

7. Necesidades de investigación futuras en el uso del agua en las centrales hortofrutícolas y en las plantas de procesado 474

Resumen

El este capítulo se aborda la importancia del manejo del agua en las etapas poscosecha y procesado de frutas y hortalizas frescas. Entre los puntos clave se identifican las diversas etapas del manejo poscosecha y procesado de frutas y hortalizas que requieren uso de agua, tales como descarga, transporte, hidro-enfriamiento, y lavado, destacando la necesidad de cumplir con estándares de calidad de agua potable para minimizar riesgos microbiológicos. Se profundiza en las definiciones de los tipos de agua utilizados en la industria y se explican las diferencias entre 'agua potable', 'agua limpia', y 'agua de proceso'. Además, se discute cómo la gestión inadecuada del agua puede facilitar la contaminación microbiológica de los productos. Se aborda la importancia de seleccionar y aplicar adecuadamente las estrategias para mitigar estos riesgos, incluyendo el uso de agentes antimicrobianos. Para mantener la calidad microbiológica del agua se mencionan las regulaciones europeas que establecen los estándares de calidad para cada tipo de desinfectante, así como la regulación española de coadyuvantes tecnológicos en el tratamiento del agua. Se examina cómo la generación y el tratamiento de aguas residuales cargadas de materia orgánica y contaminantes químicos plantean desafíos ambientales, y se sugieren tecnologías de tratamiento innovadoras para su reutilización. Se ofrecen recomendaciones para la implementación de sistemas de desinfección y monitorización en

continuo que aseguren la calidad microbiológica del agua, incluyendo la selección del desinfectante, su concentración, y el tiempo de contacto. Además, se identifican áreas críticas para la investigación futura, incluyendo el desarrollo de desinfectantes más seguros y eficaces, comprensión de mecanismos de contaminación, y desarrollo de herramientas de vigilancia más avanzadas. Se muestra la complejidad de la gestión del agua en la poscosecha y procesado de frutas y hortalizas, y se enfatiza en la necesidad de un enfoque multidisciplinar de los s diferentes sectores incluidos los procesadores y comercializadores, los científicos y la administración necesario para asegurar la inocuidad alimentaria, la sostenibilidad ambiental, y la eficiencia en el uso de los recursos hídricos.

1. Usos del agua en el acondicionamiento de productos enteros y en el procesado de productos frescos cortados

El agua desempeña un papel fundamental en etapas fundamentales en la poscosecha de frutas y hortalizas frescas (Fresh Fruit and Vegetables, FFV en inglés), siendo utilizada para facilitar la manipulación y el acondicionamiento, así como en distintos puntos del procesado. Cada etapa donde se hace uso de agua puede presentar riesgos microbiológicos específicos, los cuales están asociados con diversos factores de riesgo potenciales. Entre las etapas donde hay mayor uso de agua se incluye la descarga del producto en la línea, el transporte a lo largo de la línea, el hidro-enfriamiento y el lavado. Además, tras el cortado de las FFV se llevan a cabo dos etapas esenciales que requieren el uso de agua: el prelavado y el lavado. En términos generales, durante la manipulación poscosecha, el agua que entra en contacto directo con las partes comestibles de las FFV o con las superficies en contacto debe cumplir los estándares de calidad de agua potable (FAO y OMS, 2017). Sin embargo, la calidad del agua utilizada a lo largo del acondicionamiento puede variar según la etapa como, por ejemplo, agua limpia durante las primeras etapas de lavado, a diferencia de los enjuagues finales donde se requiere agua de calidad potable (FAO y OMS, 2017). A continuación, se detallan algunas de las etapas del acondicionamiento y manipulación poscosecha, así como del procesado donde se utiliza agua (Thompson *et al*., 2002):

Descarga

Después de la llegada del campo, las frutas y verduras (FFV) se descargan sobre cintas transportadoras, un proceso que puede ser manual en operaciones pequeñas o mecanizado en grandes instalaciones, buscando asegurar un flujo constante de producto. Para minimizar el daño durante este manejo inicial, los contenedores se pueden vaciar utilizando sistemas húmedos, optando por el volcado directo de los pallets al agua para reducir impactos entre productos. Este método requiere precaución para no descargar demasiado rápido y evitar daños. Una alternativa es el vaciado por flotación, donde el producto flota libremente mientras el pallet se sumerge y avanza a lo largo del transportador, siendo este sistema el más utilizado en frutas. El agua del tanque de descarga se recircula mediante bombas para llevar el producto flotando hacia un elevador, donde luego es enjuagado y transferido a las líneas de calibrado y selección.

Transporte

El uso de canales de agua para el transporte de las FFV en las centrales hortofrutícolas es una práctica común que ofrece beneficios significativos en términos de minimizar el daño mecánico al producto, además de proporcionar simultáneamente el lavado y enfriamiento. No obstante, una de las principales complicaciones de este sistema es la dificultad para mantener la calidad microbiológica del agua, debido a la acumulación progresiva de microorganismos, lo que eleva el riesgo de contaminación cruzada, además de comprometer la calidad y seguridad de las FFV.

Hidro-enfriamiento

El hidro-enfriamiento es una técnica efectiva para reducir rápidamente la temperatura de las FFV con el fin de mantener su calidad y prolongar su vida útil. Este método, que utiliza el agua como medio de enfriamiento, es particularmente útil para productos que pueden tolerar el contacto con agua sin deteriorarse. Sin embargo, su aplicabilidad es limitada para aquellos productos sensibles al agua, lo que explica por qué el enfriamiento por aire forzado es más común en ciertos casos. En el proceso de hidro-enfriamiento, el agua fría circula alrededor del producto, ya sea mediante un sistema de ducha o sumergiendo los productos directamente en agua fría. Los sistemas de ducha distribuyen el agua a través de una bandeja metálica perforada, aprovechando el agua fría generada por el evaporador de refrigeración para enfriar el producto de manera eficiente (Vigneault *et al*., 2008). Es crucial que los envases utilizados sean resistentes al agua y permitan un flujo vertical adecuado a través del producto, siendo los contenedores de plástico los más recomendados para este propósito. En contraste, el enfriamiento a vacío se basa en la rápida evaporación del agua de la superficie del producto, lo cual disminuye su temperatura de manera efectiva. Esta técnica es particularmente adecuada para productos que pierden humedad rápidamente, como las hortalizas de hoja. Para prevenir la deshidratación en estos casos, los productos pueden ser rociados con agua antes del proceso de enfriamiento a vacío, siendo necesaria la calidad potable del agua empleada. Ambas técnicas, el hidro-enfriamiento y el enfriamiento a vacío, tienen sus ventajas y desafíos específicos. La elección entre una u otra dependerá de las características del producto a enfriar, los requisitos de calidad y vida útil, así como la infraestructura disponible y consideraciones económicas. En todos los casos, el manejo cuidadoso del agua y la implementación de prácticas de higiene son fundamentales para garantizar la seguridad del producto final.

Además, el uso de hielo triturado en el envasado es una técnica complementaria que enfría rápidamente el producto mientras mantiene una alta humedad, contribuyendo a preservar la calidad. No obstante, tanto en el hidro-enfriamiento como en el uso de hielo triturado, existe el riesgo de contaminación cruzada entre el producto y el agua o hielo. Para mitigar este riesgo, es esencial implementar un control eficaz de la calidad del agua y del hielo, lo que incluye la desinfección y la monitorización regular de la concentración del agente desinfectante utilizado. Además, el agua de enfriamiento puede ser recirculada, siempre y cuando se controle la calidad microbiológica de la misma.

Lavado del producto entero

La limpieza y el lavado eliminan la suciedad y reducen la carga microbiana, procesos cruciales en la preparación de algunos productos como son las hortalizas de raíz, tubérculos y ciertas frutas, destinados a eliminar la tierra y residuos vegetales adheridos, lo cual no solo mejora la presentación del producto, sino que también reduce el riesgo de transmisión de patógenos. Para

productos como patatas y remolachas, las lavadoras de tambor rotativo ofrecen una solución efectiva, donde el agua a alta presión elimina los residuos sin que el producto entre en contacto con agua sucia. Para muchos productos, este proceso implica la utilización de baños con agitación o sistemas de cepillado, seguidos de un enjuague con agua potable. Este paso limpia el producto, pero puede dañar la cutícula cerosa natural que sirve como barrera contra los microorganismos, por lo que la calidad microbiológica del agua en contacto con el producto debe ser analizada y mantenida.

Además, se emplean técnicas de cepillado suave seguidas de enjuagues con agua limpia para asegurar una limpieza profunda sin dañar el producto. En el caso de ciertas frutas, como los melocotones, el cepillado húmedo se utiliza para eliminar la pelusa de la piel, mientras que las naranjas pueden ser lavadas con aspersores a alta presión para deshacerse de la suciedad superficial. Este proceso no solo mejora la apariencia de las frutas, sino que también contribuye a la eliminación del riesgo de contaminación. Por ello, es fundamental que el agua de lavado esté libre de patógenos para prevenir la contaminación cruzada. La calidad microbiológica del agua debe mantenerse mediante el uso de desinfectantes efectivos, en concentraciones adecuadas, para evitar la transmisión de patógenos, especialmente en FFV que se consumen crudas. El control y monitorización de las concentraciones de desinfectante son esenciales, al igual que la vigilancia de otros parámetros como el pH y el potencial de óxido-reducción (ORP), que influyen en la eficacia de los agentes clorados utilizados como desinfectantes. Posteriormente, algunas frutas pueden recibir tratamientos adicionales para mejorar su conservación y apariencia, como la aplicación de ceras de grado alimenticio, fungicidas, tratamientos de calcio o recubrimientos comestibles, que se pueden aplicar a través de baños de inmersión o duchas con boquillas de pulverización. Las ceras, por ejemplo, ayudan a reducir la pérdida de agua y mejoran la apariencia, aunque es importante recordar que pueden ser eliminadas en procesos de lavado posteriores. La desinfección eficaz es crítica para prevenir la contaminación cruzada microbiológica tanto dentro de un mismo lote como entre lotes distintos durante las operaciones de manipulación y procesado. Aunque la desinfección del agua mediante agentes químicos ha sido el enfoque más estudiado, la eficacia de estos tratamientos bajo condiciones industriales reales requiere de una gestión adecuada para garantizar resultados óptimos.

Pre-lavado, lavado y aclarado como etapas en el procesado

Tras el corte, los tejidos internos que anteriormente estaban protegidas por barreras naturales como la cutícula y la epidermis, se exponen al contacto directo con el agua, por lo que es fundamental la seguridad microbiológica del agua empleada. El prelavado, realizado inmediatamente después del corte elimina exudados y jugos de los tejidos tras el cortado. Este proceso varía según el tipo de producto y debe optimizarse para minimizar el uso de agua y prevenir daños al producto. Una de las recomendaciones, es que el pre-lavado se realice mediante duchas en lugar de inmersión para arrastrar los exudados y evitar la acumulación de materia orgánica en el agua del pre-lavado por la gran demanda de desinfectante que esto conlleva. Posteriormente se realiza el lavado por inmersión donde es necesario mantener y controlar el residual del desinfectante para asegurar la calidad microbiológica de agua. En cada etapa del procesado, la calidad del agua debe ser igual o superior a la etapa anterior. Implementar medidas para prevenir la contaminación cruzada a través del agua de lavado es

crucial en el procesado de FFV, especialmente porque estos productos a menudo se consumen crudos. La utilización de desinfectantes, la renovación frecuente del agua en los tanques de lavado y la implementación de sistemas de reutilización son estrategias esenciales para mantener la calidad microbiológica del agua y asegurar la inocuidad de los alimentos. Además del prelavado y el lavado, el agua se puede emplear en etapas adicionales del procesado como son:

- **Cortado por chorros de agua:** Esta técnica de corte sin contacto es ideal para productos fibrosos, logrando cortes limpios sin aumentar la temperatura del borde cortado y eliminando exudados celulares que pueden acelerar el pardeamiento.
- **Higiene personal:** Es imprescindible proporcionar agua potable para el lavado de manos y mantener una buena higiene personal entre los trabajadores, reduciendo el riesgo de contaminación durante la manipulación.
- **Limpieza y desinfección de equipos e instalaciones:** La limpieza adecuada con agua potable de equipos y superficies en contacto directo con los alimentos es necesaria para prevenir la contaminación cruzada y asegurar la inocuidad alimentaria.
- **La gestión efectiva del agua en el procesado de FFV** es un aspecto crítico que requiere una atención meticulosa de la calidad del agua, el uso de desinfectantes adecuados, y la implementación de prácticas de higiene rigurosas. Estas medidas son fundamentales para proteger la salud pública y mantener la confianza de los consumidores en la seguridad de los productos frescos.

2. Definiciones de tipos de agua empleada en la industria de productos vegetales

La normativa europea (Reglamento (CE) n° 852/2004), establece la obligatoriedad de usar 'agua potable' para el contacto directo con alimentos o superficies en contacto con estos, cumpliendo con los estándares de calidad para consumo humano definidos en la Directiva UE 2184/2020. Para las etapas iniciales de lavado, se permite el uso de 'agua limpia', caracterizada por ser agua dulce libre de contaminantes que puedan comprometer la seguridad de los alimentos. Es crucial, además, monitorizar y controlar la calidad del agua para prevenir la contaminación microbiana del producto final, permitiéndose el uso de agua no potable únicamente en situaciones donde no haya contacto directo con el alimento. El 'agua de proceso', que puede ser 'agua limpia', 'reciclada' o 'recirculada', debe adecuarse a su propósito específico sin representar un riesgo de contaminación, manteniendo estándares comparables al agua potable, a menos que las autoridades competentes determinen que su calidad no afecta la seguridad del producto. La Unión Europea, a través de legislaciones y guías como el documento de orientación de la Comisión de la UE (2017/C163/01) y la EFSA (2023), establece criterios detallados sobre la calidad del agua poscosecha, incluidos umbrales microbiológicos específicos para distintos usos y la relevancia de gestionar los riesgos tanto en la manipulación como en el procesado de alimentos, enfatizando la necesidad de adaptar los requisitos de calidad del agua a contextos específicos para asegurar la inocuidad alimentaria. La regulación sobre el uso de 'agua limpia', 'reciclada' o 'recirculada' varía entre los Estados miembros de la UE, dependiendo de las definiciones y estándares fijados por las autoridades locales (FAO y OMS, 2017). Las directrices nacionales proporcionan información detallada sobre estos términos. La implementación de

Sistemas de Gestión de Seguridad Alimentaria (SGSA), que incluyen Buenas Prácticas de Higiene y procedimientos basados en HACCP, es esencial (Comisión Europea, 2022). Según la normativa europea, para mitigar riesgos microbiológicos y químicos durante la manipulación y procesado se debe realizar análisis microbiológicos y de residuos químicos regulares del agua en contacto directo con las FFV, a menos que sea agua potable de suministro público. Por ello, la gestión adecuada de la calidad del agua en la cadena de producción de FFV es crucial para garantizar la seguridad alimentaria, requiriendo un enfoque basado en riesgos que permita la adaptación a los diferentes contextos de producción y procesado.

3. Implicaciones del agua en los riesgos microbiológicos

El mantener la calidad microbiológica del agua para el acondicionamiento y lavado de las FFV es crucial para prevenir brotes de toxiinfecciones alimentarias que pueden ser ocasionados cuando entra un producto contaminado del campo y contamina el agua, actuando esta agua de vehículo de transmisión de los patógenos que han sido arrastrados del producto, y pasando a los productos que se continúan lavando (Gombas *et al*., 2017). La contaminación del agua con microorganismos patógenos, como *Listeria monocytogenes*, *Salmonella* spp., y *Escherichia coli* patógena, representa un riesgo para la inocuidad de los alimentos, especialmente aquellos que se consumen crudos, como las frutas y hortalizas de hoja además de ciertos productos congelados como las bayas (Gil y Selma, 2006). Para mitigar estos riesgos, el uso de agentes antimicrobianos en el proceso de lavado es fundamental para prevenir la transferencia de patógenos entre productos contaminados y no contaminados. Además, el agua utilizada en estos procesos tiende a acumular altas concentraciones de materia orgánica, lo que puede afectar la eficacia de los tratamientos antimicrobianos y complicar aún más el control de la calidad microbiológica del agua. La regulación del uso de 'agua limpia', 'reciclada' o 'recirculada' dentro de la Unión Europea, bajo el Reglamento (CE) n° 852/2004 y la Directiva UE 2184/2020, establece directrices claras para garantizar que el agua en contacto directo con los alimentos cumpla con los estándares de calidad de agua para consumo humano. Además, se subraya la necesidad de monitorizar y controlar la calidad del agua para evitar la contaminación microbiana del producto final, permitiendo el uso de agua no potable solo en circunstancias donde no hay contacto directo con el alimento. Las evaluaciones cuantitativas de riesgo microbiológico (Quantitative Microbial Risk Assessment en inglés) son herramientas valiosas para establecer criterios de calidad del agua basados en objetivos de salud pública, adecuados para su aplicación en agua utilizada en alimentos. Sin embargo, la realización efectiva de una QMRA depende de datos específicos y precisos, y no puede basarse únicamente en concentraciones de indicadores microbiológicos. Además, la FAO y OMS (2017) ha desarrollado orientaciones sobre los criterios y parámetros microbiológicos que pueden utilizarse para determinar si el agua es 'apta para el propósito' en la producción pre y poscosecha de FFV. Estas orientaciones incluyen recomendaciones sobre la implementación de intervenciones prácticas pre y poscosecha para mitigar los riesgos de seguridad alimentaria cuando el agua no cumple con los requisitos necesarios.

4. Gestión de la desinfección del agua durante el manejo poscosecha y procesado

La seguridad alimentaria durante el acondicionamiento y procesado de FFV, incluidos los productos frescos cortados, enfrenta desafíos significativos que requieren una gestión eficaz de la calidad del agua. Esta gestión es esencial para mitigar el riesgo de contaminación microbiológica y garantizar la seguridad de los alimentos vegetales frescos. La implementación de desinfectantes como el cloro, el ácido peracético (PAA), o el agua electrolizada, juega un papel crucial en este proceso. La adecuada selección y aplicación de estos desinfectantes permiten minimizar la acumulación de microorganismos en el agua, contribuyendo significativamente a la inocuidad de los alimentos. La elección del agente desinfectante se basa en varios factores críticos, entre los que se incluyen su capacidad antimicrobiana, el impacto en la calidad del producto final y el cumplimiento de las regulaciones locales vigentes. Es importante destacar que los desinfectantes son considerados coadyuvantes de proceso, es decir, se utilizan con el propósito tecnológico específico de mantener la calidad microbiológica del agua empleada en las operaciones de acondicionamiento y procesado. Sin embargo, su uso debe garantizar que los residuos presentes en el producto final, ya sean de la sustancia original o sus derivados, no representen un riesgo para la salud y no afectan la calidad del producto final.

La normativa que regula el uso de estos coadyuvantes tecnológicos varía según el Estado miembro de la Unión Europea. En el caso de España, el Real Decreto 773/2023 establece la regulación de los coadyuvantes tecnológicos empleados en la elaboración y obtención de alimentos. Dicho decreto incluye una lista detallada de los coadyuvantes permitidos para el tratamiento de agua en frutas y hortalizas, especificando las condiciones de uso, la función y la cantidad máxima residual permitida. Entre los agentes de tratamiento del agua de lavado autorizados se encuentran el dióxido de cloro, hipoclorito sódico o cálcico, cloro gas, peróxido de hidrógeno/ácido peracético/ácido acético, así como la solución acuosa de ácido fosfórico y propilenglicol. Para todos ellos, se establece la necesidad de un enjuague posterior con agua potable para eliminar cualquier residuo del agente desinfectante. Específicamente, para los derivados clorados, se establece que la cantidad máxima residual debe cumplir con los niveles máximos de residuos establecidos para trihalometanos (THMs<100 µg/L), compuestos organoclorados (<200 mg/L) y clorato (<700 µg/L).

Entre los parámetros que deben controlarse se detallan algunos de los esenciales:

- **Cantidad de agua utilizada:** La cantidad de agua necesaria varía dependiendo del tipo de producto. Para las hortalizas de hoja, el consumo mínimo recomendado es de 10 litros por kilogramo, en contraste, para las frutas que oscila entre 3 a 5 litros por kilogramo. Estas recomendaciones buscan optimizar la eficiencia del lavado manteniendo un equilibrio entre el uso de recursos hídricos y la efectividad en la eliminación de contaminantes.
- **Temperatura del agua:** La temperatura óptima del agua de lavado se recomienda que sea la más baja posible, favoreciendo así un rápido enfriamiento del producto durante y después del lavado, lo cual es beneficioso para preservar su calidad y prolongar su vida útil. Sin embargo, investigaciones han evidenciado que la temperatura del agua de lavado, en comparación con la del producto, puede influir en el riesgo de infiltración de patógenos. La presencia de microorganismos patógenos en el agua de lavado como por ejemplo en el tomate, puede conducir a su infiltración a través de estomas, heridas y

otras aberturas en la superficie. La contracción del gas interno, causada por una diferencia de temperatura donde el agua está más fría que el producto, puede generar un vacío parcial facilitando la infiltración del agua contaminada a través de poros y canales. Un estudio específico en tomates demostró que células de *Salmonella enterica* se internalizaron principalmente en segmentos de tejido ubicados inmediatamente debajo de la cicatriz del tallo (Xia *et al*., 2012). Para minimizar el riesgo de infiltración, se aconseja que la temperatura del agua en el lavado sea aproximadamente 5°C superior a la temperatura del fruto. En el caso de hortalizas de hoja, como la espinaca baby, se ha observado infiltración de agua contaminada independientemente de la variación de temperatura entre el producto y el agua, la iluminación, o el grado de hidratación, factores todos ellos que influyen en la capacidad de internalización de *Salmonella* durante el lavado (Gómez-López *et al*., 2012, 2013).

- **La concentración del desinfectante.** Investigaciones realizadas por nuestro grupo han definido los umbrales de concentración de cloro necesarios para preservar la calidad microbiológica del agua de lavado. Hemos establecido que para mantener la carga microbiológica total dentro de un rango de 2 a 3 log CFU/100 mL en recuento de bacterias totales, es necesario adoptar lo que hemos denominado como 'límites operacionales'. Estos se fundamentan en la capacidad de inactivación microbiana a distintas concentraciones de cloro libre (FC), específicamente en rangos aproximados de 10, 20, y 30 mg/L, en el contexto del lavado de diversos productos en un ambiente industrial, incluyendo lechuga iceberg rallada, brotes tiernos (como rúcula, hoja de roble rojo y acelga roja), col roja rallada y dados de cebolla. Se identificó que la concentración mínima de cloro libre, basado en el recuento de bacterias totales, es de 10 mg/L para el lavado de cebolla, mientras que, para la lechuga y la col, se requieren concentraciones de hasta 20-25 mg/L. No obstante, se observó que los niveles de cloro libre en brotes tiernos no controlaban adecuadamente la acumulación de bacterias en el tanque de lavado incluso a la concentración más alta de 30 mg/L (Tudela *et al*., 2019a).

Las intervenciones destinadas a la desinfección del agua se consideran efectivas cuando logran mantener la calidad microbiológica del agua de proceso en niveles que previenen la contaminación cruzada, tanto dentro del mismo lote como entre distintos lotes a lo largo de las etapas de manipulación y procesado. La literatura especializada sugiere que las estrategias de desinfección del agua incluyen tratamientos químicos y físicos, así como combinaciones de estos, aunque su implementación a escala industrial ha recibido menos atención en comparación con estudios a nivel de laboratorio y planta piloto. Los desinfectantes basados en cloro y PAA, ya sea de manera individual o combinada, son ampliamente utilizados en la Unión Europea para el tratamiento del agua de proceso en el lavado de FFV, demostrando ser efectivos bajo condiciones de laboratorio óptimas (López-Gálvez y Gil, 2020). Sin embargo, existe una notable falta de datos sobre su eficacia en condiciones reales de producción industrial para la mayoría de los procesos y tipos de FFV. Hasta la fecha, solo los desinfectantes a base de cloro han mostrado efectividad para prevenir la acumulación de microorganismos en el agua de proceso en contextos industriales, subrayando la necesidad de una gestión adecuada para asegurar la eficacia deseada (Tudela *et al*., 2019b). La eficiencia de estos tratamientos antimicrobianos puede verse afectada por varios factores, incluyendo la presencia de materia orgánica lo que resalta la importancia de un manejo meticuloso del agua en los procesos de

lavado de FFV. La implementación de prácticas adecuadas de higiene y la adopción de tecnologías apropiadas para el tratamiento del agua son fundamentales para asegurar la seguridad alimentaria y proteger la salud de los consumidores.

Cuando se cuente con sistemas de recirculación que incluya la filtración avanzada para minimizar el consumo de agua y evitar la dispersión de contaminantes, se deber acompañar de la monitorización y control continuo que asegure la calidad microbiológica del agua mediante pruebas regulares y el seguimiento de las concentraciones de desinfectante y de los parámetros físico-químicos. La limpieza y el mantenimiento regular de los sistemas de filtración son fundamentales para prevenir la acumulación de sedimentos y biofilms, que pueden proteger y albergar microorganismos patógenos. Estas estrategias, cuando se implementan de manera integrada, contribuyen a mantener la calidad y seguridad de las FFV, minimizando al mismo tiempo el impacto ambiental mediante la reducción del consumo de agua (Garrido *et al*., 2020).

Es esencial para las industrias de procesado y manipulación de alimentos comprender y aplicar metodologías de reutilización y reciclado del agua para conservar recursos y garantizar la seguridad alimentaria. La regulación de la cantidad de agua empleada, la temperatura del agua, y la concentración de desinfectantes constituyen factores críticos en el proceso de lavado de FFV.

5. Impacto medioambiental del agua de proceso y del agua residual

En el ámbito de la industria de productos frescos, la gestión del agua durante el procesado, particularmente durante el lavado de FFV, juega un papel crucial tanto para la seguridad alimentaria como para la sostenibilidad ambiental. Los desafíos asociados con el manejo de las aguas residuales que están cargadas de materia orgánica, microorganismos y contaminantes químicos, requieren enfoques innovadores y sostenibles para su tratamiento y reutilización. Las estrategias para mitigar estos retos incluyen la reducción del volumen de aguas residuales generadas y la implementación de tecnologías de tratamiento que permitan la recuperación y reutilización del agua de manera eficiente. Diferenciando los tratamientos aplicados directamente en el tanque de lavado de aquellos implementados fuera de línea, se busca minimizar el impacto negativo en la calidad del producto y promover prácticas sostenibles y económicamente viables (López-Gálvez y Gil, 2020) .La adopción de tecnologías de tratamiento fuera de línea, que permiten una mayor flexibilidad en los tiempos de contacto y la dosificación de desinfectantes, dificulta la implementación a nivel industrial, principalmente debido a su alto costo y complejidad de mantenimiento. Sin embargo, la justificación para su uso radica en la necesidad de abordar el alto costo asociado a los vertidos, la escasez de agua y la carga de contaminantes en las aguas residuales. Los tratamientos como la filtración, floculación, coagulación, centrifugación, ósmosis inversa y tratamiento UV representan opciones prometedoras para generar agua reutilizable de calidad para el procesado de productos frescos (Albolafio *et al*., 2021). Empresas como AvanTech han desarrollado soluciones innovadoras que facilitan el lavado de productos vegetales con agua reutilizada, minimizando el riesgo de contaminación cruzada y preservando la calidad del agua en contacto con el producto (Garrido *et al*., 2020).

Esta aproximación no solo aborda la reducción de los riesgos microbiológicos y químicos asociados al agua regenerada y su reutilización en lavado tradicional por inmersión, sino que también promueve la estabilidad de la calidad del agua, ofreciendo un camino hacia prácticas más sostenibles y eficientes en la industria de productos frescos. La gestión eficaz de las aguas residuales, mediante su tratamiento y reutilización, marca un paso importante hacia la sostenibilidad, reduciendo el impacto ambiental y contribuyendo a la conservación de los recursos hídricos, a la vez que se garantiza la seguridad y calidad de los alimentos procesados.

6. Consejos prácticos para optimizar la desinfección del agua de lavado en las centrales hortofrutícolas y en plantas de procesado de frutas y hortalizas

Para abordar los desafíos relacionados con la seguridad de las FFV durante la manipulación y el procesado, es necesario implementar una gestión efectiva de la calidad del agua. Esta gestión debe enfocarse en prevenir la contaminación cruzada, crucial para mantener la inocuidad de los alimentos y proteger la salud de los consumidores. Las estrategias para mantener la calidad del agua y minimizar la contaminación incluyen el uso adecuado de desinfectantes, sistemas de recirculación con filtración, monitorización y control continuo de los desinfectantes, y mantenimiento y limpieza regulares.

La selección y optimización de sistemas de desinfección son clave para lograr una inactivación microbiana efectiva y rápida, considerando factores como la eficacia antimicrobiana del desinfectante, las características del agua, y el tipo de producto. Además, la implementación de prácticas de monitorización en continuo (on line/in line) asegura que la concentración de desinfectante se mantenga dentro de un rango óptimo, adaptándose a posibles variaciones en la calidad del agua o la carga microbiana. Esta monitorización precisa y regular del nivel de desinfectante es esencial para garantizar una desinfección eficaz. Empresas como Smartwash Solutions™ han liderado el desarrollo de tecnologías avanzadas para el control preciso de la concentración de desinfectantes, como el residual de cloro libre y el pH, mejorando así la seguridad alimentaria y preservando la calidad del producto. La adopción de estas tecnologías y prácticas avanzadas de monitorización y control de la calidad microbiológica del agua en la industria hortofrutícola es esencial para abordar los desafíos actuales y futuros en la seguridad e higiene de los alimentos, contribuyendo a la protección de la salud pública y al cumplimiento de las normativas ambientales relacionadas con la gestión del agua, los desinfectantes y los vertidos.

7. Necesidades de investigación futuras en el uso del agua en las centrales hortofrutícolas y en las plantas de procesado

La seguridad de los productos frescos es una prioridad en la industria alimentaria, con avances recientes en la gestión del lavado industrial de productos frescos contribuyendo significativamente a la reducción de riesgos microbiológicos. Sin embargo, aún existen desafíos críticos que requieren atención para garantizar la inocuidad de estos alimentos para los consumidores. Entre estos desafíos se incluyen:

- **Desarrollo de desinfectantes más seguros y eficaces**: Es fundamental encontrar y utilizar desinfectantes que maximicen la eliminación de patógenos mientras se minimizan los efectos negativos en la calidad de los productos y en la generación de subproductos de desinfección que puedan eliminarse al medio ambiente.
- **Conocer los mecanismos de contaminación microbiológica**: Un conocimiento más profundo sobre cómo los microorganismos patógenos contaminan los productos frescos puede conducir a estrategias más efectivas de prevención y control.
- **Desarrollo de herramientas de vigilancia y control más eficaces: La** implementación de tecnologías avanzadas y prácticas innovadoras para monitorear y controlar la calidad microbiológica del agua y los productos on line es esencial para anticipar y mitigar los riesgos de contaminación.

Para abordar estos desafíos y optimizar la desinfección del agua de lavado, se deben considerar varios factores clave, incluyendo:

- **Tipo de desinfectante:** La selección del desinfectante adecuado depende del tipo de producto a lavar y del riesgo específico de contaminación microbiológica asociado.
- **Concentración del desinfectante:** Es crucial ajustar la concentración residual del desinfectante para garantizar su efectividad sin comprometer la seguridad y calidad del producto.
- **Tiempo de contacto:** El tiempo que los productos están en contacto con el desinfectante debe ser suficiente para lograr una inactivación lo más rápida posible.
- **Presencia de materia orgánica:** La materia orgánica en el agua puede reducir la efectividad del desinfectante, por lo que es importante minimizar su presencia eliminándola con duchas antes de que el producto entre en el tanque de lavado.

Para garantizar una desinfección eficaz del agua de lavado y reducir los riesgos microbiológicos, se deben seguir buenas prácticas como el mantenimiento regular de los sistemas de desinfección, calibración de sensores de medida precisos, la prevención de la contaminación cruzada, y la monitorización en continuo de la calidad del agua de lavado. Cada vez son más los parámetros físico-químicos que se pueden medio ron line en un tanque de lavado. Por ejemplo, una sonda de medida de la absorbancia con el fin de monitorizar la acumulación de materia orgánica (https://www.analyticaltechnology.com/uv254-monitoring/).

Abordar estos desafíos y seguir estas prácticas ayudará a mejorar la seguridad microbiológica de los productos frescos, permitiendo a los consumidores disfrutar de estos alimentos con confianza y tranquilidad, al mismo tiempo que se protege la salud pública y se promueve la sostenibilidad ambiental.

Bibliografía

Albolafio, S.; Gil, M.I.; Allende, A.; Xanthakis, E. (2021). Potential of wastewater valorization after wet extraction of proteins from faba bean and pea flours. Recent Progress in Materials 2021; 3(2), doi:10.21926/rpm.2102013

Comisión Europea, (2022) sobre la implementación de sistemas de gestión de seguridad alimentaria que cubren Buenas Prácticas de Higiene y procedimientos basados en los

principios de HACCP, incluyendo la facilitación/flexibilidad de la implementación en ciertos establecimientos de alimentos (2022/C 355/01). 16.9.2022, pp. 1–58.

Directiva UE 2184/2020 del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de diciembre de 2020 sobre la calidad del agua destinada al consumo humano.

European Commission, 2022. Commission notice on the implementation of food safety management systems covering Good

Hygiene Practices and procedures based on the HACCP principles, including the facilitation/flexibility of the implementation in

certain food businesses (2022/C 355/01). 16.9.2022, p. 1–58.

EFSA BIOHAZ Panel (EFSA Panel on Biological Hazards), Koutsoumanis, K., Ordoñez, A. A., Bolton, D., Bover-Cid, S., Chemaly, M., De Cesare, A., Herman, L., Hilbert, F., Lindqvist, R., Nauta, M., Nonno, R., Peixe, L., Ru, G., Simmons, M., Skandamis, P., Suffredini, E., Banach, J., Ottoson, J., Zhou, B., da Silva Felicio, M.T., Jacxsens, L., Lourenço Martins, J., Messens, W. and Allende, A. (2023). Microbiological hazards associated with the use of water in the post-harvest handling and processing operations of fresh and frozen fruits, vegetables and herbs (ffFVHs). Part 1 (outbreak data analysis, literature review and stakeholder questionnaire). EFSA Journal, 21(11), 1–111. https://doi.org/10.2903/j.efsa.2023.8332

FAO y OMS (2019). Safety and quality of water used in food production and processing – meeting report. Microbiological Risk Assessment Series 33. Rome. 100 pp: https://www.fao.org/documents/card/fr/c/ca6062en/

Garrido, Y.; Tudela, J.A.; Marín, A.; Allende, A.; Gil, M.I. (2020). Reconditioning of wash water for the fresh-cut industry. Adv. Food Process Technol. 1: 126. DOI: 10.29011/2639-3387.100126

Gil, M.I.; Selma, M.V. (2006). Overview of hazards in fresh-cut produce production. Control and management of food safety hazards. En: J. James (Ed.), Microbial hazard identification in fresh fruits and vegetables (pp. 155-219). Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

Gombas, D.; Luo, Y.; Brennan, J.; Shergill, G.; Petran, R.; Walsh, R.; Hau, H.; Khurana, K.; Zomorodi, B.: Rosen, J.; Varley, R.; Deng, K. (2017). Guidelines to validate control of cross-contamination during washing of fresh-cut leafy vegetables. J. Food Prot. 80: 312-330.

Gómez-López, V.M.; Marín, A.; Medina-Martínez, M.S.; Allende, A.; Gil M.I. (2012). Riesgo de internalización de *Salmonella* en brotes de espinaca durante el lavado. En: Recasens I., Graell J., Echeverría, G (Eds), Avances en postcosecha de frutas y hortalizas (pp. 253-258).

Gómez-López, V.M.; Marín, A.; Allende, A.; Beuchat, L.R.; Gil, M.I. (2013). Postharvest handling conditions affect internalization of *Salmonella* in baby spinach during washing. J. Food Protect., 76, 145-1151. https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-539

López-Gálvez, F.; Gil, M.I. (2020). La importancia del agua en la industria de alimentos vegetales. ARBOR Ciencia, Pensamiento y Cultura, Vol. 196-795. https://doi.org/10.3989/arbor.2020.795

Real Decreto 773/2023, de 3 de octubre, por el que se regulan los coadyuvantes tecnológicos utilizados en los procesos de elaboración y obtención de alimentos. Núm. 237, 4 de octubre, Sec. I. Pág. 132612.

Reglamento (CE) No 852/2004 del Parlamento Europeo y del Consejo de 29 de abril de 2004, relativo a la higiene de los productos alimentarios. DOUE-L-2004-81035, pp. 1–54.

Thompson, J.F.; Mitchan, E.J.; Mitchell, F.G. (2002). Preparation for fresh market. En: A.A. Kader. (Ed.), Postharvest technology of horticultural crops. Publication 3311. (pp. 71-79), University of California, Agriculture and Natural Resources.

Tudela, J.A.; López-Gálvez, F.; Allende, A.; Hernández, N.; Andújar, S.; Marín, A.; Garrido, Y.; Gil, M.I. (2019a). Operational limits of sodium hypochlorite for different fresh produce wash water based on microbial inactivation and disinfection by-products (DBPs). Food Control, 104, 300-307. https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.05.005

Tudela, J.A.; López-Gálvez, F.; Allende, A.; Gil, M.I. (2019b). Chlorination management in commercial fresh produce processing lines. Food Control, 2019, 106, https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106760

Vigneault, C.; Rennie, T.J.; Toussaint, V. (2008). Cooling of freshly cut and freshly harvested fruits and vegetables. Stewart Postharvest Review 4(3) (pp. 1-10) https://doi.org/10.2212/spr.2008.3.4

Xia, X.; Luo, Y.; Yang, Y.; Vinyard, B.; Schneider, K.; Meng, J. (2012). Effects of tomato variety, temperature differential, and post-stem removal time on internalization of *Salmonella enterica* serovar Thompson in tomatoes. J. Food Prot. 75:297-303.

LO MEJOR DE CADA COSECHA
wymasolutions.com

Todo lo que necesitas para lavar, procesar y envasar zanahorias, papas, cebollas, betabel (remolachas), y frutas

Volcado

Receptores

Remoción de piedras

Sistemas de transporte

Remoción de residuos

Cepillado

Lavado

Pulidora de vegetales

Cortadora

Procesamiento de vegetales

Reciclado de agua

Enfriamiento

Secado

Clasificación

Inspección

Llenado

¡Saca lo mejor de cada cosecha!

Contacto Europeo

T: +420 312 312 733
eu.sales@wymasolutions.com

Contacto en Latino America

T: +52 222 849 1101
yosef.spinoza@syagrosa.com

Wyma es experta en diseñar líneas completas, gestión de proyectos y automatización. Ofrecemos un diseño totalmente flexible e implementación experta, respaldados por un servicio de la más alta calidad durante toda la vida útil de nuestros productos

5.2. Ahorro de agua en las centrales hortofrutícolas

Actividad Demostrativa AIGUA.NET.

Pilar Plaza*, Natàlia Alòs, Sara Acosta, Maribel Abadias, Elena Costa y Neus Teixidó

[1] *IRTA, Edifici Fruitcentre, Programa de Postcosecha, Lleida*

* *Pilar.Plaza@irta.cat*

Índice

1. Introducción 480

2. Actividad demostrativa AIGUA.NET: objetivos y metodología 482

2.1 Caracterización del agua de balsas de vaciado de palots en empresas del Valle del Ebro 482

2.2 Relación contaminación fúngica del agua vs incidencia podredumbres en fruta..... 483

2.3. Degradación del desinfectante en presencia de materia orgánica..... 484

3. Riesgo microbiológico: aparición de podredumbres 485

3.1. ¿Qué niveles de contaminación fúngica hay en al agua de las balsas de volcado?..... 485

3.2. ¿La contaminación en el agua de la balsa es un peligro de podredumbres para la fruta? 486

4. Riesgo químico: contaminación cruzada..... 490

5. Degradación del desinfectante 492

5.1. ¿Qué niveles de materia orgánica se acumulan en el agua? 493

5.2. ¿Cómo se degradan los desinfectantes en esas condiciones de suciedad?..... 494

6. Conclusiones..... 496

Resumen

Las empresas frutícolas utilizan elevados volúmenes de agua en su proceso postcosecha, siendo las balsas de volcado de palots especialmente problemáticas debido a que el agua suele reutilizarse durante varios días. En estas condiciones, se pueden acumular microorganismos (hongos que pueden provocar podredumbres y bacterias que pueden causar una alerta sanitaria); residuos químicos procedentes de la fruta, los envases o derivados de la desinfección (por ejemplo, cloratos); y suciedad (materia orgánica e inorgánica) que puede interferir en la eficacia de los desinfectantes.

Con el objetivo de ahorrar agua en este proceso e intentar alargar el máximo posible la reutilización de la misma sin que se comprometa la calidad de la fruta, es necesario conocer a qué ritmo se contamina el agua de estas balsas, cuáles son los umbrales de contaminación

fúngica que causan infección y podredumbres a la fruta y cuáles son los umbrales de contaminación química que pueden dejar residuos no deseados.

Para dar respuesta a estas preguntas y poder realizar una gestión del agua más sostenible, se realizó la Actividad Demostrativa 'Mejora de la gestión del agua de las balsas de volcado de fruta (AIGUA.NET)', ref. Nº: 56 30045 2021 P4, financiada a través de la Operación 01.02.01 de Transferencia Tecnológica del Programa de Desarrollo Rural de Catalunya 2014-2022. El principal objetivo de este proyecto era demostrar a las empresas que es posible reutilizar el agua de las balsas durante semanas, incluso meses, sin que suponga un riesgo microbiológico o químico para la fruta. Se seleccionaron 6 empresas frutícolas de la zona de Lleida y Zaragoza, cada una de ellas con características distintas en cuanto a la gestión del agua: con o sin filtrado en continuo, que usaban dosis bajas, medias o altas de cloro, que trabajaban fruta de hueso o de pepita, etc., y en todas ellas se hizo un seguimiento de la contaminación fúngica, química y de los parámetros fisicoquímicos del agua a lo largo de un ciclo completo.

Se demostró que es necesario implementar un sistema de filtrado en continuo como paso previo para poder alargar la vida útil del agua y que, en estas condiciones, se pueden utilizar técnicas o dosis de desinfectantes más respetuosas con el medio ambiente y con menos riesgos para la seguridad alimentaria. Durante el periodo de transición hasta su implementación, el uso de ácido perácetico como desinfectante ofrece la ventaja respecto del hipoclorito sódico de su mayor estabilidad en condiciones de extrema suciedad que presentan las balsas sin filtrado.

1. Introducción

La gestión sostenible de los recursos hídricos es una de las preocupaciones más apremiantes en el contexto global actual. En este marco, la agricultura emerge como uno de los sectores que más agua demanda, siendo vital para la producción de alimentos y esencial para el desarrollo económico. En el caso concreto de las empresas frutícolas, el agua se utiliza en varios puntos del proceso productivo: en el tratamiento postcosecha en el drencher para el control de podredumbres, en las balsas de volcado en líneas de confección que disponen de vaciador de palots en agua, en las líneas de precalibrado para transportar la fruta por los distintos canales, el agua de las duchas de enjuagado, etc.

De todas ellas, las balsas de las líneas de confección y de las líneas de precalibrado son las que mayor volumen de agua utilizan. Las de vaciado de palots suelen estar diseñadas para trabajar con un volumen de agua de entre 5.000 y 10.000 L, mientras que las de precalibrado, con varios canales de agua, pueden llegar a tener más de 60.000 L. Es agua potable, que a priori no se le añade ningún producto fitosanitario, y cuyo único objetivo es un manejo más cuidadoso de la fruta durante su volcado a la línea y su manipulación, a la vez que un cierto efecto de limpieza de los restos procedentes de campo o de la cámara de conservación. Son muchos litros de agua al cabo del año, por ello, la estrategia actual para el ahorro es su reutilización durante varios días o semanas.

Sin embargo, hay que ser muy consciente de todos los riesgos que conlleva reutilizar el agua de estas balsas, ya que en ella se van sumergiendo continuamente palots de fruta, incorporando

parte de la suciedad y la contaminación que suelen llevar y que se va acumulando hasta que se cambia el agua.

Los riesgos microbiológicos pueden ser de origen fúngico o bacteriano. La contaminación fúngica puede provenir de frutos podridos presentes en los palots que se vacían en el agua, por la contaminación asociada a la tierra con la que suelen llegar los palots de campo al arrastrase por la finca, la propia contaminación existente en las maderas de los palots, etc. Dependiendo del nivel de contaminación que se haya acumulado en el agua, ésta puede suponer una fuente de inóculo para la fruta, infectarla y, si se dan las condiciones adecuadas, desarrollar podredumbres causando pérdidas económicas. Por otro lado, pero no menos importante, el agua se puede contaminar por bacterias patógenas para el ser humano (*Escherichia coli, Listeria monocytogenes, Salmonella* spp, etc.). En este caso, el riesgo asociado a esta contaminación generará una alerta sanitaria o, en el peor de los casos, un brote por intoxicación alimentaria si un consumidor ingiere una pieza de fruta contaminada por estos patógenos.

Con el fin de prevenir o reducir el riesgo de contaminación microbiológica, la mayoría de las empresas utilizan agentes desinfectantes (coadyuvantes tecnológicos) en los procesos en los que se recircula el agua para poder alargar su vida útil y así reducir el coste del agua.

Por otro lado, la acumulación en el agua de productos químicos que pueden estar presentes en la superficie del fruto como son los residuos de fitosanitarios aplicados en el campo o en postcosecha o residuos presentes en los palots, pueden actuar como fuente de contaminación cruzada para la fruta que se está procesando. En este caso, el agua tiene un efecto de lavado de estos productos químicos que se van acumulando y que pueden contaminar la fruta con la que entran en contacto. Esto puede ocasionar un problema no sólo por detección de materias activas no autorizadas en un cultivo (cuando se procesa en la misma línea fruta de hueso y de pepita, o bien producto ecológico y convencional, por ejemplo), sino también por el incremento de residuos y ser un inconveniente en clientes que limitan el número de materias activas. Hay que ser consciente de esta problemática si se pretende reutilizar el agua durante semanas y es necesario conocer cómo se puede minimizar este riesgo.

Figura 1. Aspecto de una balsa sin sistema de filtrado en continuo tras ser reutilizada 3 días (izquierda); y balsa con sistema de filtrado en continuo tras 6 semanas reutilizando el agua (derecha)

Por último, la acumulación de tierra, materia orgánica e inorgánica, etc., en el agua en recirculación puede interferir en la actividad desinfectante y desencadenar otros riesgos como puede ser la formación de trihalometanos o la acumulación de cloratos si se utiliza hipoclorito

como agente desinfectante. En los últimos años, son muchas las empresas que se han empezado a interesar por equipos de filtrado en continuo que retornan el agua a la balsa con una calidad prácticamente de agua potable permitiendo alargar su vida útil durante meses.

A lo largo del presente capítulo se exponen parte de los resultados obtenidos en la Actividad Demostrativa AIGUA.NET, en los que se analizan diferentes realidades en la gestión y tratamiento de agua en centrales de fruta de hueso y de pepita ubicadas en el Valle del Ebro, las problemáticas a las que se enfrentan en cada tipo de gestión, así como las recomendaciones en términos de filtrado y de tratamiento de dichas aguas que permitan un uso sostenible y eficiente de este escaso recurso.

2. Actividad demostrativa AIGUA.NET: objetivos y metodología

El objetivo principal de este proyecto fue transferir al sector las diferentes alternativas para poder alargar la vida útil del agua utilizada en las balsas de las líneas de confección sin que represente un riesgo microbiológico para la fruta ni un riesgo de seguridad alimentaria por la presencia de residuos químicos.

Con el fin de alcanzar este objetivo se llevó a cabo durante los años 2022-2024 la Actividad Demostrativa 'Mejora de la gestión del agua de las balsas de volcado de fruta (AIGUA.NET)', ref. Nº: 56 30045 2021 P4, financiada a través de la Operación 01.02.01 de Transferencia Tecnológica del Programa de Desarrollo Rural de Catalunya 2014-2022, del 'Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural' de la Generalitat de Catalunya.

2.1 Caracterización del agua de balsas de vaciado de palots en empresas del Valle del Ebro

Se eligieron 6 empresas frutícolas de la zona de Lleida y Aragón, que realizaban una gestión muy diferenciada del agua de la balsa en cuanto al filtrado y a la dosis de desinfectante (hipoclorito en todos los casos) que utilizaban. Con el fin de poder realizar un análisis más completo se eligieron empresas que trabajaban sólo fruta de hueso, sólo fruta de pepita, así como empresas que trabajan conjuntamente ambas especies en la misma balsa. Las características de las 6 empresas fueron las siguientes:

- Empresa con sistema de **filtrado en continuo** (sistema Ilerdagua®) del agua de la balsa de volcado de fruta, con desinfección posterior a una **dosis BAJA de cloro** (1-2 ppm). Esta empresa trabajaba tanto fruta de hueso como de pepita y mantuvo el agua en la balsa durante **9 semanas**, tiempo en el que procesó 980.000 kg de fruta.
- Empresas sin sistema de filtrado con:
    - Desinfección con **dosis ALTA de cloro** (50-80 ppm). Empresa que trabajaba tanto fruta de hueso como de pepita y que mantuvo el agua en la balsa durante **3 días**, tiempo en el que procesó 305.000 kg de fruta.
    - Desinfección con **dosis MEDIA de cloro** (15-20 ppm). Empresa que trabajaba exclusivamente fruta de hueso y que mantuvo el agua en la balsa durante **3 días**, tiempo en el que procesó 151.000 kg de fruta.

- Desinfección con **dosis BAJA de cloro** (<3 ppm). Empresa que trabajaba **fruta de hueso** y que mantuvo el agua en la balsa durante **5 días**, tiempo en el que procesó 142.000 kg de fruta.
- Desinfección con **dosis BAJA de cloro** (<3 ppm). En este caso se hizo el seguimiento en dos empresas, una de la zona de Lleida y la otra de la zona de Aragón, ambas trabajaban exclusivamente **fruta de pepita**, manzana y pera, y mantuvieron el agua durante **5 días**, tiempo en el que procesaron 42.000 kg y 100.000 kg de fruta.

En cada empresa, se realizaron muestreos a lo largo de un ciclo de agua. Se entiende un ciclo el tiempo en el que se está reutilizando la misma agua, desde que se llena la balsa hasta que se vacía. Con una frecuencia diaria o semanal (para la empresa con filtrado en continuo) se analizaron los siguientes parámetros:

- Población fúngica (en ufc/mL): se realizaron siembras del agua en placas con medio de cultivo Rosa de Bengala Cloranfenicol Agar (RBCA) y Patata Dextrosa Agar (PDA), para poder identificar los géneros fúngicos, especialmente los que son patógenos de fruta de pepita y de hueso. La toma de muestra se realizaba en tubos con tiosulfato sódico para inactivar el cloro residual.
- Residuos de productos químicos: en el último muestreo de cada ciclo, se tomaron muestras de agua y de la fruta (antes y después de estar en contacto con el agua), y se realizaron analíticas multiresiduos y analíticas de cloratos por un laboratorio externo acreditado.
- Parámetros físicoquímicos: se analizó la turbidez (NTU), cantidad de materia orgánica mediante la determinación de la DQO (mg O_2/L), pH, conductividad, concentración de cloro libre (ppm) y potencial Redox. Estos factores son indicativos de la presencia de suciedad y de la capacidad desinfectante del biocida que se utilice.

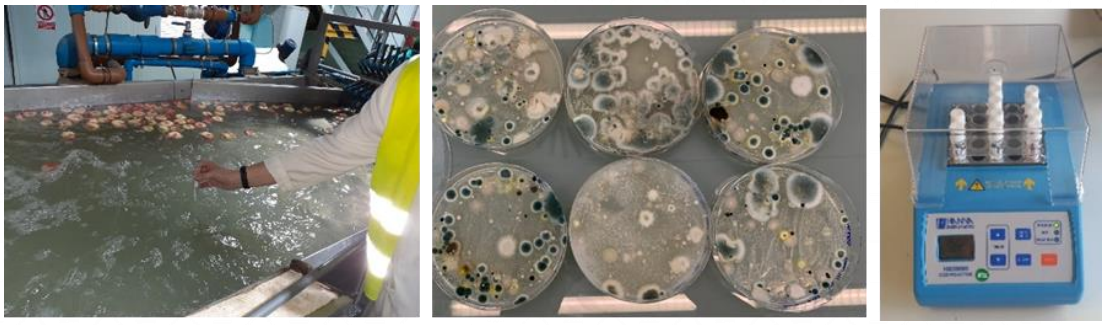


Figura 2. De izquierda a derecha, toma de muestras para la siembra del agua en placas con medio de cultivo, crecimiento microbiológico en una de las siembras y determinación de la DQO en el digestor

2.2 Relación contaminación fúngica del agua vs incidencia podredumbres en fruta

Para relacionar la población fúngica, concretamente la de mohos patógenos encontrados en el agua, con el peligro real de contaminación de la fruta con la que entran en contacto en la balsa, en las instalaciones del IRTA se prepararon suspensiones de esporas de *Penicillium* sp., *Rhizopus* sp., *Geotrichum* sp. y *Monilinia* sp. a diferentes concentraciones (0, 10, 100 y 1000 esp/mL). En ellas se sumergieron durante 30 segundos, tiempo similar al que la fruta se encuentra en la balsa de volcado, lotes de 20 frutos de diferentes variedades de manzana (Golden y Jeromine), pera (Blanquilla, Conference, Limonera, Williams) y fruta de hueso (melocotón Sweet Moon,

nectarina Honey Royal y Latered y paraguayo ASF 07-98). Previamente la fruta se desinfectó para que el inóculo natural de la epidermis no interfiriera en los resultados y se le hicieron 2 heridas en la zona ecuatorial por fruto. Tras los baños, la fruta se incubó a 20 °C y a los 3, 5 o 7 días, dependiendo del patógeno y la variedad, se hizo el recuento de las heridas que habían desarrollado podredumbre.

Para evaluar el efecto del estado de madurez en la susceptibilidad a desarrollar la podredumbre, en todas las variedades de pera y de fruta de hueso se dejaron lotes 3 días a 20 °C para tener fruta más madura y menos madura. En nectarina, melocotón y paraguayo los lotes sin madurar presentaban una firmeza inicial de 4,5-5,5 kg y, tras el periodo de maduración, la penetromía bajó a 1,5-2,5 kg. En las variedades de pera se partía de firmezas iniciales de 5.5-6.5kg y tras la maduración bajaron a 3-4 kg.

Figura 3. Detalle de la inmersión de un lote de pera en la suspensión de esporas (izquierda) y lotes de fruta preparados para ser inoculados con las distintas concentraciones de esporas (derecha)

2.3. Degradación del desinfectante en presencia de materia orgánica

Finalmente, también se quiso comprobar la capacidad desinfectante de 2 biocidas en las condiciones de turbidez y DQO como las encontradas en condiciones reales en las balsas de volcado de palots. Para ello se prepararon 4 soluciones de agua con tierra, para obtener 4 concentraciones de DQO (0, 100, 250 y 500 mg O_2/L), y se añadió hipoclorito sódico o ácido peracético + peróxido de hidrógeno para tener 3 concentraciones de estos desinfectantes: 2, 15 y 50 ppm de cloro libre y 50, 100 y 150 ppm de ácido peracético (PAA). A los 0, 30, 60 minutos, y 3 horas de contacto, se midió la concentración de cloro libre y de PAA para conocer la curva de degradación de estos desinfectantes en estas condiciones de suciedad.

Figura 4. Preparación del ensayo donde se observa la solución de agua con DQO de 500 mg O_2/L y equipo para la determinación de la concentración de desinfectante

3. Riesgo microbiológico: aparición de podredumbres

La contaminación fúngica en balsas de volcado de fruta puede tener para la empresa una repercusión económica muy importante ya que están directamente relacionados con pérdidas de producto por podredumbres, reclamaciones de clientes o alertas sanitarias.

Se consideró imprescindible conocer: 1) cual era el nivel de contaminación fúngica que se acumulaba en el agua durante un ciclo, en función de la gestión que realizaba la empresa, y 2) qué riesgo de contaminar, infectar y pudrir fruta representaba esta contaminación.

3.1. ¿Qué niveles de contaminación fúngica hay en al agua de las balsas de volcado?

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos en las diferentes empresas en los muestreos realizados a lo largo del ciclo (S_n: semanas; D_n: días).

Como era de esperar, las balsas con un mayor nivel de contaminación fúngica fueron aquellas en las que no se filtraba el agua y se utilizaban dosis de cloro muy bajas, inferiores a los 3 ppm, llegando a detectar hasta 100 ufc/mL de mohos, mientras que en el resto de las empresas la población fúngica apenas alcanzó, en el peor de los casos, un nivel de 10 ufc/mL.

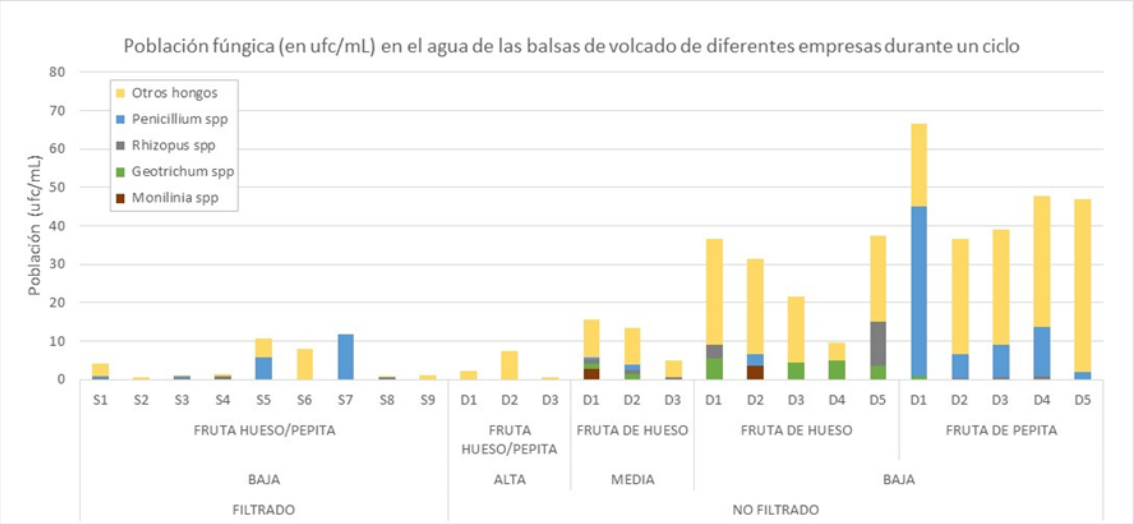


Figura 5. Población de mohos (en ufc/mL) en el agua de las balsas de volcado, durante un ciclo en el que se había reutilizado el agua (S: semana; D: día) en función del sistema de filtrado, la dosis de cloro y el tipo de fruta que procesaba cada empresa. Los resultados de no filtrado, dosis baja y fruta de pepita son la media de dos empresas

En cuanto a la tipología de especies fúngicas detectadas se diferencian (Figura 5):

- **Mohos que no correspondían a las principales especies patógenas en postcosecha de fruta** de hueso y de pepita y que, por lo tanto, no serían problemáticas ya que no tendrían la capacidad de infectar la fruta con la que entrarían en contacto y causar podredumbres. Estas especies correspondieron a géneros como *Trichoderma* spp, *Cladosporium* spp, *Alternaria* spp, etc., que suelen ser hongos presentes en la tierra de las fincas, en la materia orgánica (restos vegetales como hojas) o en el ambiente de la central.
- **Especies patógenas de fruta,** destaca en este bloque la presencia en el agua de patógenos como *Penicillium* sp. en las empresas que trabajaban fruta de pepita. Hay que tener en cuenta que la contaminación en el agua de la balsa proviene

principalmente de la fruta y de los palots que la contienen y que se vacían en la balsa, por lo tanto, si en estos palots hay frutos podridos y esporulados, o bien si en las maderas de los palots ha crecido micelio durante los meses de conservación, la contaminación que se incorporará al agua será muy superior que si se usan palots de plástico. La mayoría de los equipos automatizados de vaciado de palots sumergen parcial o totalmente el palot en el agua.

Otro hongo que puede suponer un riesgo si se detecta en elevadas concentraciones en el agua es *Rhizopus* sp. Este hongo, característico de fruta de hueso puede suponer un problema si en el agua contaminada se trabaja también fruta de pepita, puesto que ambas son huéspedes de este patógeno. Sin embargo, en los muestreos realizados la población de este patógeno ha sido más baja de la esperada según la experiencia previa del Servicio Técnico Postcosecha del IRTA.

Las poblaciones de los otros patógenos importantes como *Geotrichum* sp. o *Monilinia* sp. se encontraron en bajas concentraciones, menores de 10 ufc/mL, y muy localizadas en las empresas que procesaban fruta de hueso con dosis bajas o medias de cloro.

Aunque los niveles de contaminación fúngica fueron bajos en las empresas que utilizaron dosis medias o altas de cloro, no hay que perder de vista que en esos casos el agua solamente se mantuvo tres días, para evitar los problemas de cloratos que probablemente aparecerían si se hubiese alargado más tiempo. Por lo tanto, y aunque en este caso la desinfección fue correcta, no sería una opción medioambientalmente sostenible ya que el objetivo final es mantener el agua el mayor tiempo posible.

El sistema de filtrado del agua en continuo usando dosis de cloro muy bajas, es, sin duda, el elemento clave para poder mantener el agua durante más tiempo, ya que consiguió mantener el nivel de contaminación fúngica por debajo de los 10 ufc/mL durante las 9 semanas en las que se llegaron a procesar un total de 980.000 kg. El hecho de mantener el agua filtrada, con un nivel de materia orgánica, de turbidez, de sólidos en suspensión, etc., muy bajos, implicó que con dosis muy bajas de cloro residual (1-2 ppm) se consiguió una desinfección completa de la misma.

3.2. ¿La contaminación en el agua de la balsa es un peligro de podredumbres para la fruta?

La gran incógnita cuando se habla de contaminación es conocer el riesgo real que representa para la fruta el nivel de contaminación que se acumula en el agua, es decir, cómo de peligrosa es esta contaminación y cómo de importante es aplicar estrategias de control para minimizarla. Por ello, es imprescindible conocer el umbral a partir del cual la contaminación del agua va a causar infección y desarrollo de podredumbres a la fruta.

En las siguientes gráficas se muestra la incidencia de heridas que desarrollaron podredumbre, en condiciones controladas en el IRTA, cuando se sumergieron distintos lotes de fruta en suspensiones de esporas de *Penicillium* sp., *Rhizopus* sp., *Geotrichum* sp. y *Monilinia* sp. a diferentes concentraciones (0, 10, 100 y 1000 esp/mL).

Como se puede observar, la incidencia de frutos podridos incrementó exponencialmente a medida que la concentración de esporas en el agua aumentó, con diferencias significativas. Es decir, cuanto mayor contaminación fúngica haya en el agua de la balsa de volcado, mayor será el peligro de que la fruta que se procese se infecte y se acabe pudriendo.

Así, niveles de contaminación de 100 esp/mL de *P. expansum* en el agua (Figura 6) llegarían a infectar y causar podredumbre en un 40-80% de las heridas, en las variedades de pera estudiadas, y una incidencia menor, entre el 20-40% en las variedades de manzana. Niveles de 10 esp/mL, más similares a los detectados en los controles realizados serían capaces de causar el 10% de podridos en pera y el 4-5% en manzana.

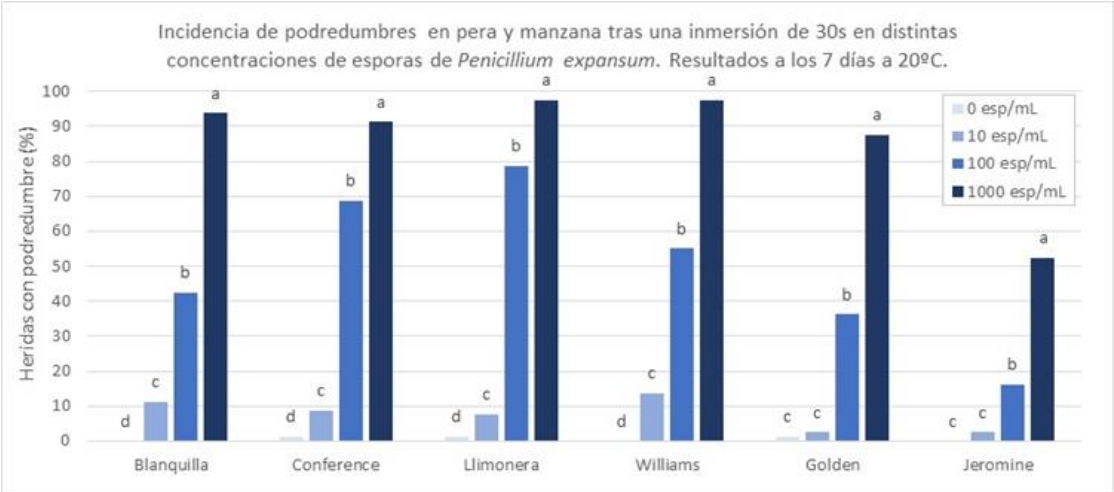


Figura 6. Incidencia de podredumbre azul en variedades de pera y manzana, tras 7 días de incubación, habiendo sido sumergidas 30 segundos en diferentes concentraciones de esporas de *Penicillium expansum*. Para cada variedad, letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel de significación del 5%

En el caso de contaminación por *Rhizopus* sp. en el agua (Figura 7), los resultados muestran un perfil parecido, con una incidencia de podridos muy elevada ante concentraciones de 100 y 1000 esp/mL, tanto en las variedades de pera como en las especies de fruta de hueso que se evaluaron, ya que éste es un patógeno importante tanto en fruta de hueso como de pepita. Niveles de 10 esp/mL en el agua, como los encontrados en algunos de los controles, causarían también porcentajes de infección nada despreciables, del 5-20% de los frutos.

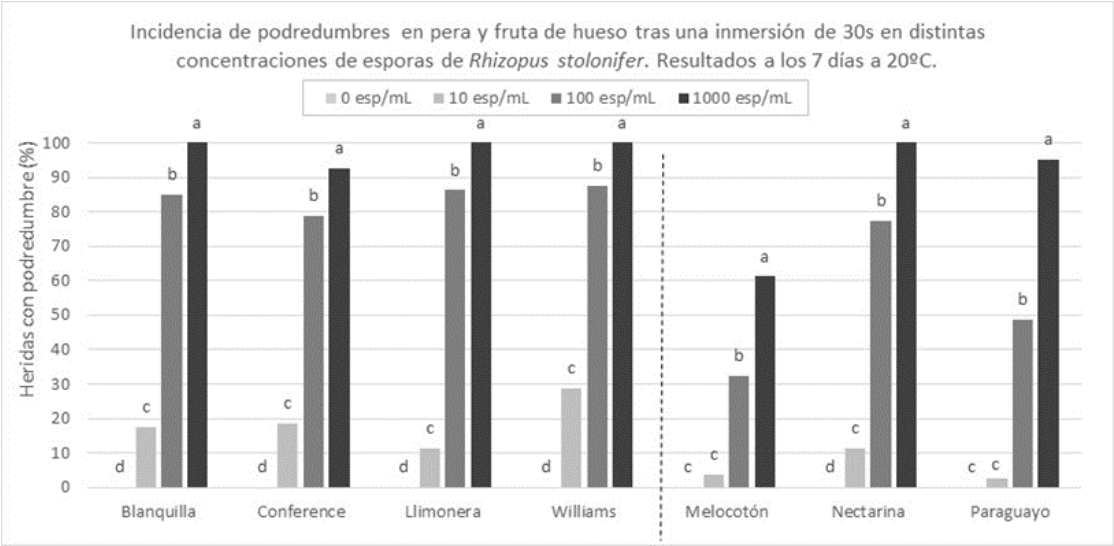


Figura 7. Incidencia de podredumbre por Rhizopus en variedades de pera y fruta de hueso, tras 7 días de incubación, habiendo sido sumergidas 30 segundos en diferentes concentraciones de esporas de Rhizopus stolonifer. Para cada variedad, letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel de significación del 5%

La capacidad de infección de esporas de *Monilinia* sp. (Figura 8) parece ser menor a la observada en los otros dos patógenos a altas concentraciones, pero 10 esp/mL causarían entre el 7 y el 30% de frutos podridos. No se muestran los resultados obtenidos en *Geotrichum candidum* ya que los niveles de infección fueron extremadamente bajos, incluso con concentraciones de 1000 esp/mL no se alcanzaron ni un 10% de frutos podridos, por lo que no pudieron extraerse conclusiones al respecto.

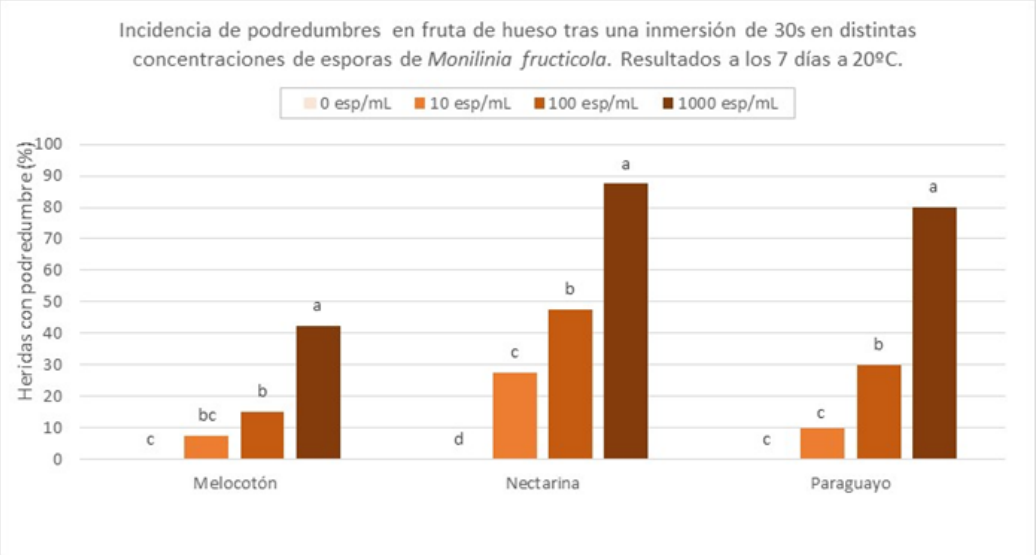


Figura 8. Incidencia de podredumbre marrón en variedades de fruta de hueso, tras 7 días de incubación, habiendo sido sumergidas 30 segundos en diferentes concentraciones de esporas de *Monilinia fructicola*. Para cada variedad, letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel de significación del 5%

En la siguiente gráfica (Figura 9) se compara la capacidad de infectar la fruta de los cuatro patógenos estudiados, para una misma concentración de esporas en el agua, y se puede observar la gran diferencia entre ellos, especialmente a concentraciones elevadas.

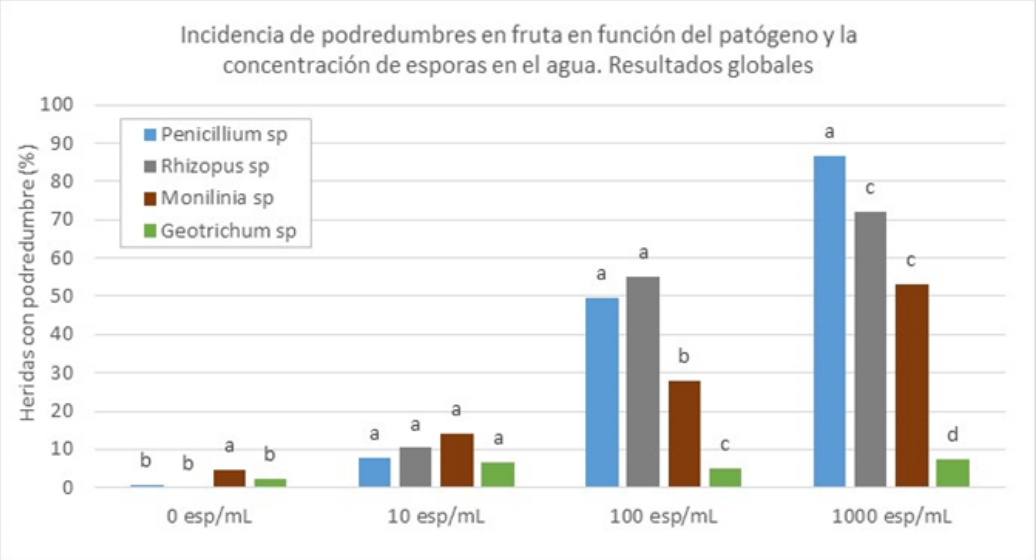


Figura 9. Incidencia de podridos (%) después de 5-7 días de incubación habiendo sido sumergida la fruta 30 segundos en diferentes concentraciones de esporas de diferentes patógenos. Valores globales para todas las variedades y estados de madurez evaluados. Para cada concentración de esporas, letras diferentes indican diferencias significativas a un nivel de significación del 5%

Mientras que 1000 esp/mL de *Pencillium expansum* en el agua causó un 85% de frutos podridos en la fruta que se sumerge, 1000 esp/mL de *Geotrichum candidum* sólo causó un 7.5% (valores medios para todas las variedades y estados de madurez evaluados). En los niveles de contaminación habituales que podemos encontrar en las balsas de volcado, 10 esp/mL, no hubo diferencias significativas entre patógenos.

Hay que tener en cuenta que, en todos estos ensayos, tras los 30 segundos de inmersión de la fruta en las distintas concentraciones de esporas, no se realizó un enjuagado con agua potable mediante ducha, como suele ser habitual y aconsejable en las líneas de confección de las empresas. Es muy probable que los porcentajes de podridos en esas circunstancias fueran sustancialmente menores. También hay que decir que, en muchas ocasiones, especialmente en fruta de hueso, ésta suele recibir un tratamiento fungicida mediante pulverización en la misma línea de confección, por lo que, aunque hubiera habido una contaminación de las heridas en el agua de la balsa, quizás habría sido controlada por el efecto del fungicida y el impacto hubiese sido mucho menor.

Está claro que la calidad de la fruta es determinante en la susceptibilidad a desarrollar podredumbres. De hecho, en todos los ensayos realizados apenas aparecieron podridos fuera de las heridas provocadas intencionadamente. Solamente en algunos lotes de pera que fueron madurados aparecieron podridos fuera de las heridas, en un 10-40% de los frutos, seguramente porque madurarlas habría debilitado la piel y favorecido la aparición de heridas.

El estado de madurez de la fruta en el momento de la contaminación también puede influir en la incidencia final de podredumbres. Los lotes madurados fueron más susceptibles a infectarse, pero solo se encontraron diferencias significativas a niveles de 10 esp/mL en el agua. Sin embargo, en todos los casos el desarrollo de la podredumbre fue más rápido en los frutos madurados (fila superior de las Figuras 10 y 11), como se observa en las fotografías siguientes con infecciones de *Rhizopus* sp. en pera y nectarina.

Figura 10. Pera Conferencia madurada (fila superior) y no madurada (fila inferior), habiendo estado sumergida durante 30 segundos en agua con 0, 10, 100 y 1000 esporas de *Rhizopus* sp/mL, después de 7 días de incubación a 20 °C

Figura 11. Nectarina Latered madurada (fila superior) y no madurada (fila inferior), habiendo estado sumergida durante 30 segundos en agua con 0, 10, 100 y 1000 esporas de *Rhizopus* sp/mL, después de 7 días de incubación a 20 °C

Por lo tanto, en base a los resultados obtenidos se puede concluir que es muy importante realizar una correcta gestión del agua de la balsa de volcado y mantenerla bien desinfectada ya que, sino, la contaminación que se puede acumular si no se utilizan desinfectantes y se reutiliza muchos días, realmente puede infectar la fruta que se procese y causar un % de podridos que será motivo de reclamación para los clientes y/o de pérdidas económicas para la empresa. No obstante, el porcentaje de podridos dependerá de varios factores, la especie y variedad, el estado de madurez, la calidad en cuanto a heridas, el patógeno que contamine el agua, los tratamientos posteriores que recibirá la fruta (enjuagado con agua, tratamiento fungicida, etc.).

4. Riesgo químico: contaminación cruzada

Además de suciedad y contaminación microbiológica, también se pueden ir acumulando productos químicos que están presentes en la epidermis del fruto (como residuos de fitosanitarios aplicados en el campo o en postcosecha), residuos presentes en los palots derivados de la desinfección o de un tratamiento postcosecha en cámara o en drencher, o residuos derivados del propio proceso de desinfección del agua como cloratos y trihalometanos. Así pues, el agua no solo representa un riesgo microbiológico, sino que es un punto crítico de posible contaminación cruzada de productos químicos desde el agua a la fruta dejando un residuo que puede llegar hasta el consumidor final.

En esta actividad demostrativa, se corroboró que, efectivamente, en el agua se acumulan residuos químicos, aunque a concentraciones tan bajas que apenas tienen capacidad de contaminar la fruta con la que entran en contacto. En la Figura 12 se muestra el número total de materias activas detectadas en el agua en el último control del ciclo, y en la fruta antes (muestra tomada directamente del palot) y después de ser vaciada en la balsa (muestra tomada

en la rampa de salida de la balsa, antes de la ducha de enjuagado). Solamente en 3 casos la fruta a la salida de la balsa presentaba más residuos que los detectados antes (marcados en rojo en el gráfico).

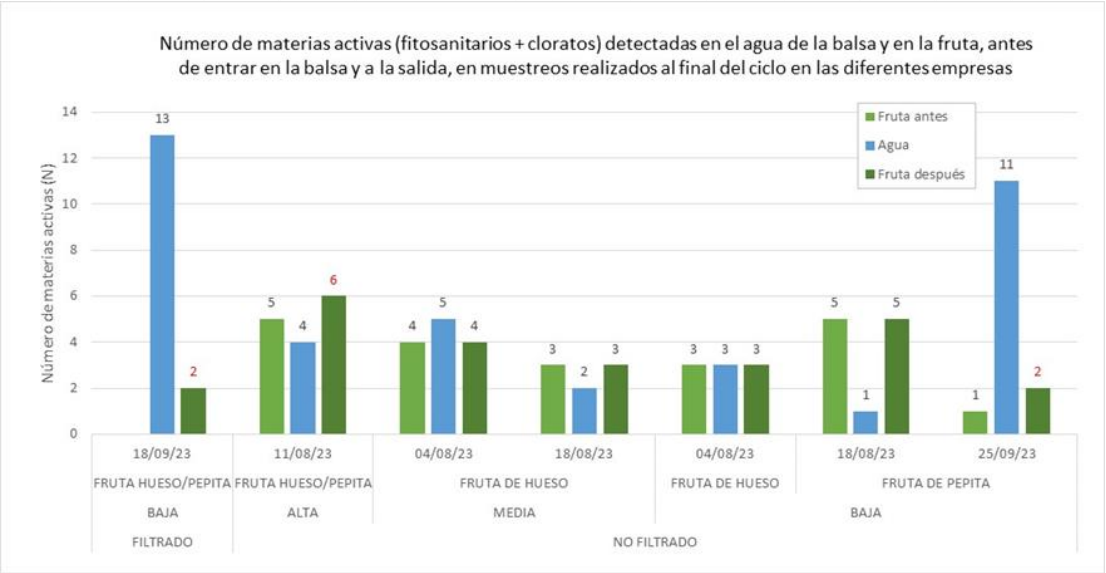


Figura 12. Número de materias activas (residuos de fitosanitarios + cloratos) en el agua de las balsas de volcado de palots y en la fruta antes y después de pasar por la balsa, al final de cada ciclo

Si analizamos estos casos, se observa que en dos de ellos es la materia activa 'captan', la que aparece en la muestra de fruta tras el paso por la balsa, sin embargo, en el agua no se había detectado este fungicida en ninguno de los dos casos, por lo que se deduce que provendría de la propia fruta y que debido a la variabilidad de las muestras no habría aparecido en la muestra del palot.

Pero sí hay dos casos en los que se detectó un residuo presente en el agua que se incorporó a la fruta y que antes no tenía, y fueron los cloratos. Los cloratos son productos de desinfección del agua de lavado (DPB, *disinfection by-products*) generados durante el proceso de desinfección del agua. Son muy importantes a nivel comercial ya que tienen un LMR bajo, de 0,05 ppm. Además, incrementa el número de materias activas en la fruta por lo que puede suponer un problema comercial a la hora de vender la fruta a clientes que limiten el número de materias activas o clientes con protocolos específicos en los que se prohíba expresamente la presencia de este subproducto.

Uno de los casos en que se detectaron cloratos, fue en el agua de la empresa que utilizó dosis muy altas de cloro, de entre 50-80 pm. Se llegaron a acumular en 3 días tras trabajar 305.000 kg de fruta, 6.100 µg/L de cloratos, que dejaron un residuo en el paraguayo que se estaba procesando de 0.059 ppm. Este valor supera el LMR establecido por la legislación. Como se ha comentado anteriormente, las muestras se tomaron a la salida de la balsa, antes de las duchas de enjuagado, por lo que es muy probable que este residuo disminuyera por debajo del LMR tras las duchas. Es sumamente importante tener siempre las duchas de enjuagado en funcionamiento y a la presión suficiente para eliminar los posibles residuos que se incorporan en la balsa.

Por otro lado, en el agua de la balsa que realizaba un filtrado en continuo y una desinfección con hipoclorito sódico, pero a dosis bajas de 1-2 ppm, también se acumularon cloratos, en este caso

28.000 µg/L, que habrían dejado un residuo en la pera que se estaba trabajando en ese momento de 0,025 ppm de cloratos. Este valor está muy por debajo del LMR fijado, pero aumentaría el número total de materias activas.

Si comparamos ambos escenarios, que a priori parecen totalmente opuestos (ciclo de 3 días vs 9 semanas), vemos que ambos tienen en común la cantidad acumulada de hipoclorito que debieron de utilizar. En uno de ellos, por querer alcanzar dosis muy altas de cloro en un agua con suciedad y materia orgánica que mermaría la capacidad desinfectante, y en el otro, por utilizar dosis muy bajas de cloro, pero de forma continuada durante 9 semanas y que el sistema de filtración no es capaz de eliminar.

También llama la atención que no hay una relación entre el nivel de cloratos detectado en el agua y en la fruta, seguramente porque se trata de especies muy distintas en cuanto a la epidermis, la pera con una piel más lisa retendría menos residuo que el paraguayo con la pilosidad y la forma plana del fruto.

Finalmente, destacamos la gran variabilidad en el número de materias activas que se acumularon al final del ciclo en las distintas empresas. Es lógico pensar que en el agua que se mantiene durante 9 semanas se van a acumular más residuos que en las que la mantienen 3 días o 1 semana. Sin embargo, el riesgo de que el agua sea un medio en el que acumulen químicos va a depender de factores como la duración del ciclo de agua, o, mejor dicho, los quilos de fruta que se sumergen en esa agua, el tipo de fruta, los tratamientos químicos aplicados en el campo o en postcosecha, el desinfectante utilizado, etc.

Aunque el uso de sistemas de filtrado incrementó la presencia de residuos fitosanitarios en el agua de la balsa, permitió reutilizarla durante varias semanas o incluso meses, hecho impensable para las balsas sin filtrado por los riesgos de contaminación microbiológica o por cloratos que supondría, por lo que es la opción medioambientalmente más sostenible. En este sentido existen filtros de carbón activo que pueden acoplarse al sistema de filtrado en continuo y utilizarse cada cierto tiempo (3-4 semanas) para reducir de forma significativa los residuos químicos acumulados garantizando la inocuidad del agua.

5. Degradación del desinfectante

La calidad del agua utilizada en las operaciones postcosecha cambia constantemente debido al producto (fruta y envases) que se va introduciendo de forma continua. Conocer cómo se va ensuciando el agua de las balsas es determinante ya que las características fisicoquímicas como el pH, la turbidez, la carga de materia orgánica, etc., son indicadores del deterioro de la calidad de la misma y van a interferir en la capacidad desinfectante del producto que se utilice.

Por todo ello, en esta actividad demostrativa se consideró imprescindible conocer: 1) la evolución de los parámetros fisicoquímicos del agua en las condiciones de trabajo particulares de cada empresa, y 2) ante esas condiciones, cuál es el mejor producto desinfectante a utilizar, y cuáles van a ser las consideraciones a tener en cuenta para conseguir los mejores resultados.

5.1. ¿Qué niveles de materia orgánica se acumulan en el agua?

La materia orgánica puede medirse como Demanda Química de Oxigeno (DQO), sólidos totales, turbidez y conductividad, entre otros. En esta actividad demostrativa se realizaron controles de estos parámetros, pero solamente se muestran los relacionados con la turbidez y la DQO.

La empresa con sistema de filtrado en continuo consiguió mantener en todos los controles a lo largo de las 9 semanas una turbidez inferior a 5 NTU (Figura 13), con lo que se podía ver el fondo de la balsa (Figura 1).

Estos resultados indican que, no solo el sistema de filtrado es eficaz (sistema Ilerdagua®), sino que estaba óptimamente dimensionado para que el ritmo de filtrado fuera superior al ritmo que se incorporaba la suciedad y así conseguir que ésta no se acumulara.

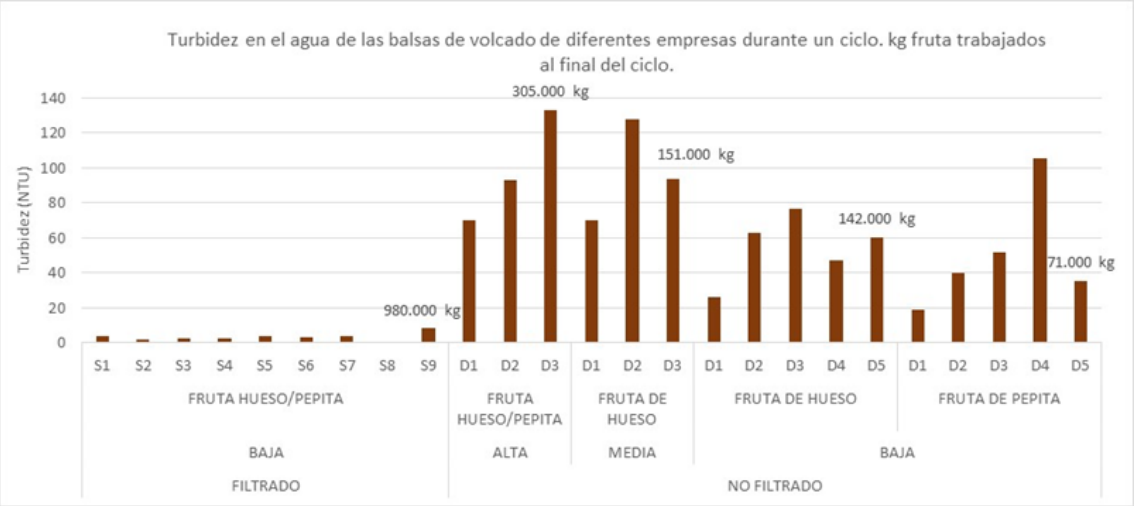


Figura 13. Turbidez (en NTU) en el agua de las balsas de volcado de palots con y sin filtrado en continuo, durante un ciclo en el que se había mantenido la misma agua (S: semanas; D: días) y utilizado dosis distintas de cloro (Alta, Media o Baja). Los resultados de no filtrado, dosis baja y fruta de pepita son la media de dos empresas

En cambio, las centrales que no filtraban el agua alcanzaron niveles de turbidez mucho más elevados, que variaron dependiendo de los quilos volcados y del tipo de fruta que confeccionaban pero que se situaron entre 50-100 NTU en la mayoría de los controles realizados.

La DQO (Demanda Química de Oxígeno) es una medida de la cantidad de oxígeno requerida para oxidar los componentes orgánicos presentes y es un indicador de la carga orgánica presente en el agua. Este parámetro es determinante en la eficacia de algunos desinfectantes como el cloro, el ozono y el peróxido de hidrogeno, entre otros.

Los resultados obtenidos mostraron tendencias similares a las obtenidas en la turbidez, el sistema de filtrado en continuo permite mantener la DQO en valores inferiores a los 50 mg O_2/L, mientras que balsas sin filtrado pueden llegar a acumular niveles 10 veces superiores, de 500 mg O_2/L tras tres días de trabajo.

Figura 14. Demanda Química de Oxígeno (DQO, en mg O_2/L) en el agua de las balsas de volcado de palots con y sin filtrado en continuo, durante un ciclo en el que se había mantenido la misma agua (S: semanas; D: días) y utilizado dosis distintas de cloro (Alta, Media o Baja). Los resultados de no filtrado, dosis baja y fruta de pepita son la media de dos empresas

5.2. ¿Cómo se degradan los desinfectantes en esas condiciones de suciedad?

Se evaluaron dos de los desinfectantes más utilizados en el sector hortofrutícola, el hipoclorito sódico y el formulado a base de ácido peracético (PAA) y peróxido de hidrogeno.

Conocer su estabilidad en presencia de materia orgánica y el ritmo de degradación del desinfectante, puede dar una idea de cada cuanto tiempo y qué cantidad se deberá añadir para conseguir mantener la concentración objetivo y así mantener la calidad microbiológica del agua evitando contaminaciones cruzadas.

En la siguiente grafica (Figura 15) se muestra la degradación del cloro libre en las soluciones de agua con distinto nivel de materia orgánica (0, 100, 250 i 500 mg O_2/L) a las que se añadió hipoclorito sódico para conseguir 2, 15 o 50 ppm cloro, a lo largo de las 3 horas posteriores. Se aprecia cómo, a medida que el agua presentó valores más elevados de DQO, la degradación del cloro libre en la solución fue mayor y más rápida.

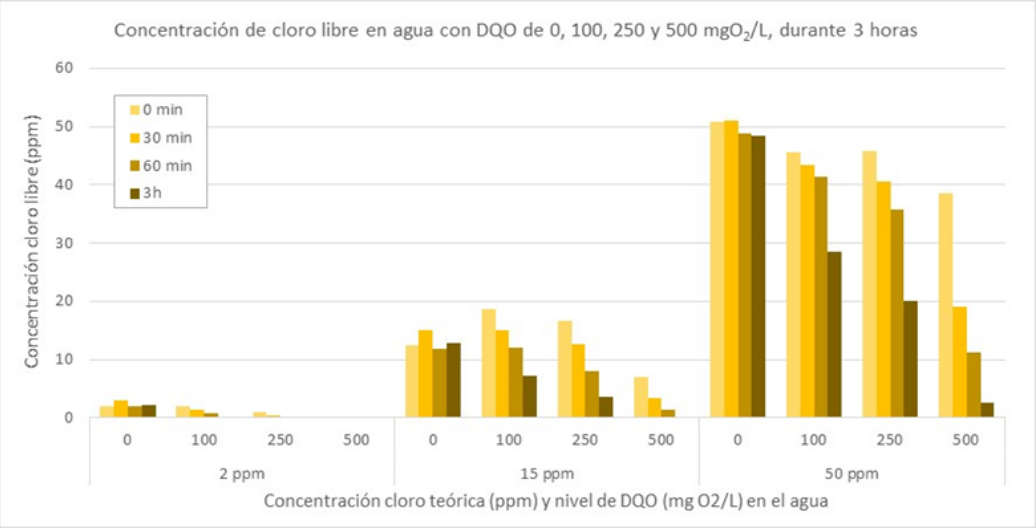


Figura 15. Concentración de cloro libre en soluciones de agua con distinto nivel de cloro inicial y de DQO, a los 0, 30, 60 minutos y 3 horas

Así, si se desea una concentración de cloro de 2 ppm, solamente se consigue mantener estable durante 3 horas si el agua no tiene materia orgánica. Con un nivel de DQO de 100 mg O_2/L, como el encontrado en algunos de los muestreos, al cabo de 1h la concentración de cloro fue inferior a 1 ppm. En el agua con mayor nivel de DQO (500 mg O_2 /L), prácticamente no se detectó cloro inmediatamente después de incorporarlo. En estas aguas tan cargadas de materia orgánica, incluso las concentraciones más elevadas de cloro libre (50 ppm) prácticamente desaparecen tras 3 h de contacto.

Estos resultados implican, a nivel práctico, que no se puede alargar la vida útil del agua de la balsa si se acumulan niveles altos de materia orgánica y se usa hipoclorito de sodio como desinfectante. En estas condiciones, el nivel de desinfectante se degrada rápidamente lo que implica que, o bien se debe añadir constantemente producto, con el riesgo de acumulación de cloratos y de formación de trihalometanos, o bien se correría el riesgo de estar trabajando con concentraciones de cloro por debajo de las efectivas con el peligro microbiológico que esto supondría.

En cambio, en las mismas condiciones de suciedad, el ácido peracético mostró una estabilidad mucho mayor (Figura 16) y prácticamente se consiguió mantener durante 3 horas la concentración inicial, independientemente del nivel de DQO. En el peor de los casos, con soluciones de DQO de 500 mg O_2/L, tras 3 horas de contacto solamente se redujo la concentración de PAA en un 20%, mientras que en las mismas condiciones con hipoclorito sódico el cloro se redujo un 93,2%.

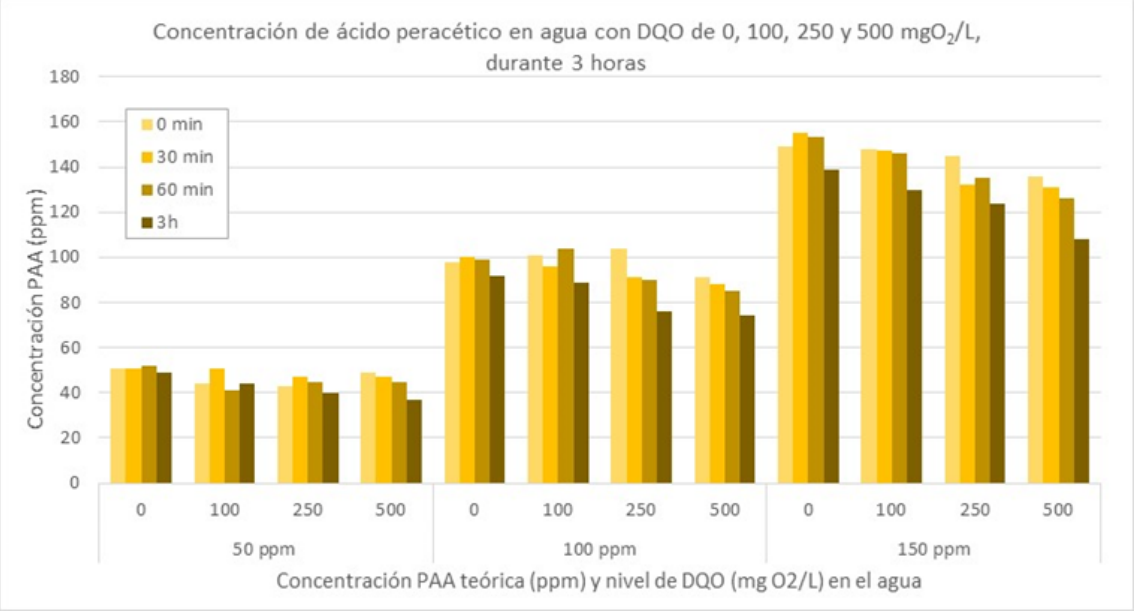


Figura 16. Concentración de ácido peracético en soluciones de agua con distinto nivel de ácido peracético inicial y de DQO, a los 0, 30, 60 minutos y 3 horas

A nivel práctico estos resultados indican que el desinfectante a base de ácido peracético puede ser una opción muy interesante si se desea alargar la vida útil del agua de la balsa en esos casos en que no se disponga de un sistema de filtrado en continuo, ya que la dosificación del producto durante el tiempo en que se mantendría la vida útil sería mucho menor y sin picos en la concentración del desinfectante, garantizando así un nivel bajo de contaminación fúngica en la misma. Queda por determinar la eficacia desinfectante en las condiciones estudiadas.

En esta actividad demostrativa, todavía en curso, se realizarán los mismos ensayos con otros desinfectantes como el hipoclorito cálcico, el dióxido de cloro y el ozono.

6. Conclusiones

Se desconoce el volumen real de litros de agua que utiliza el sector frutícola español en los procesos postcosecha en centrales hortofrutícolas, pero haciendo una estimación aproximada del consumo de agua solamente en las balsas de volcado de palots para una empresa estándar sin sistema de filtrado en continuo, se pueden superar ampliamente el millón de litros anuales.

Por ello, y en el proceso de cambio climático en el que nos encontramos inmersos a nivel mundial, con una escasez creciente de agua, es indispensable que las empresas dispongan de la información necesaria para saber cómo hacer un uso más sostenible y efectivo del agua en el proceso postcosecha y alargar su vida útil durante el máximo de tiempo posible, pero garantizando su calidad y sin comprometer la calidad y la seguridad alimentaria de la fruta.

En este proyecto se ha demostrado que, si la empresa quiere ahorrar agua y la mantiene en la balsa de volcado de palots durante varios días, ésta se contamina microbiológicamente y algunos de los hongos que se acumulan son especies patógenas de fruta de hueso y de pepita. Dependiendo de la especie, la variedad, el estado de madurez, el patógeno, etc., los niveles de contaminación en el agua pueden llegar a causar hasta un 30% de frutos podridos. Además, también se acumulan residuos químicos derivados de los productos fitosanitarios que quedan en la piel de la fruta o en los palots, si bien no parece que estos productos se acumulen en niveles suficientemente elevados para que se acumulen en la fruta.

Si en estas condiciones de intentar mantener el agua durante varios días, se quiere reducir la contaminación microbiológica se pueden añadir desinfectantes y, si se utilizan a unas concentraciones suficientes, con un sistema de control y dosificación adecuado, el agua queda bien desinfectada y no representa un riesgo de infección para la fruta.

Sin embargo, hay que vigilar y no utilizar concentraciones elevadas de cloro ni alargar excesivamente los días en que se mantiene el agua ya que la suciedad que se acumula hace que cada vez se tenga que añadir más hipoclorito para alcanzar el nivel de desinfectante efectivo, de manera que se pueden acumular cloratos en el agua a niveles suficientemente altos como para contaminar la fruta. El uso del ácido peracético puede ser una opción interesante en estas condiciones de suciedad ya que presenta una estabilidad mucho mayor y es capaz de mantener la concentración durante varias horas, aunque falta por determinar su eficacia desinfectante en estas condiciones.

En base a los resultados obtenidos en esta Actividad Demostrativa se ha llegado a la conclusión que **es imprescindible disponer de un sistema de filtrado en continuo para poder alargar la vida útil del agua durante meses**, manteniendo un nivel de contaminación microbiológica bajo, tanto por el efecto del filtrado en continuo que no deja que se acumule materia orgánica, como por la mayor eficacia del desinfectante incluso utilizado a dosis bajas. Además, en estas condiciones en las que se mantienen niveles muy bajos de turbidez y DQO se pueden explorar

otros productos o técnicas desinfectantes físicas o químicas, más amigables con el medio ambiente y que no dejen residuos químicos como cloratos.

Agradecimientos

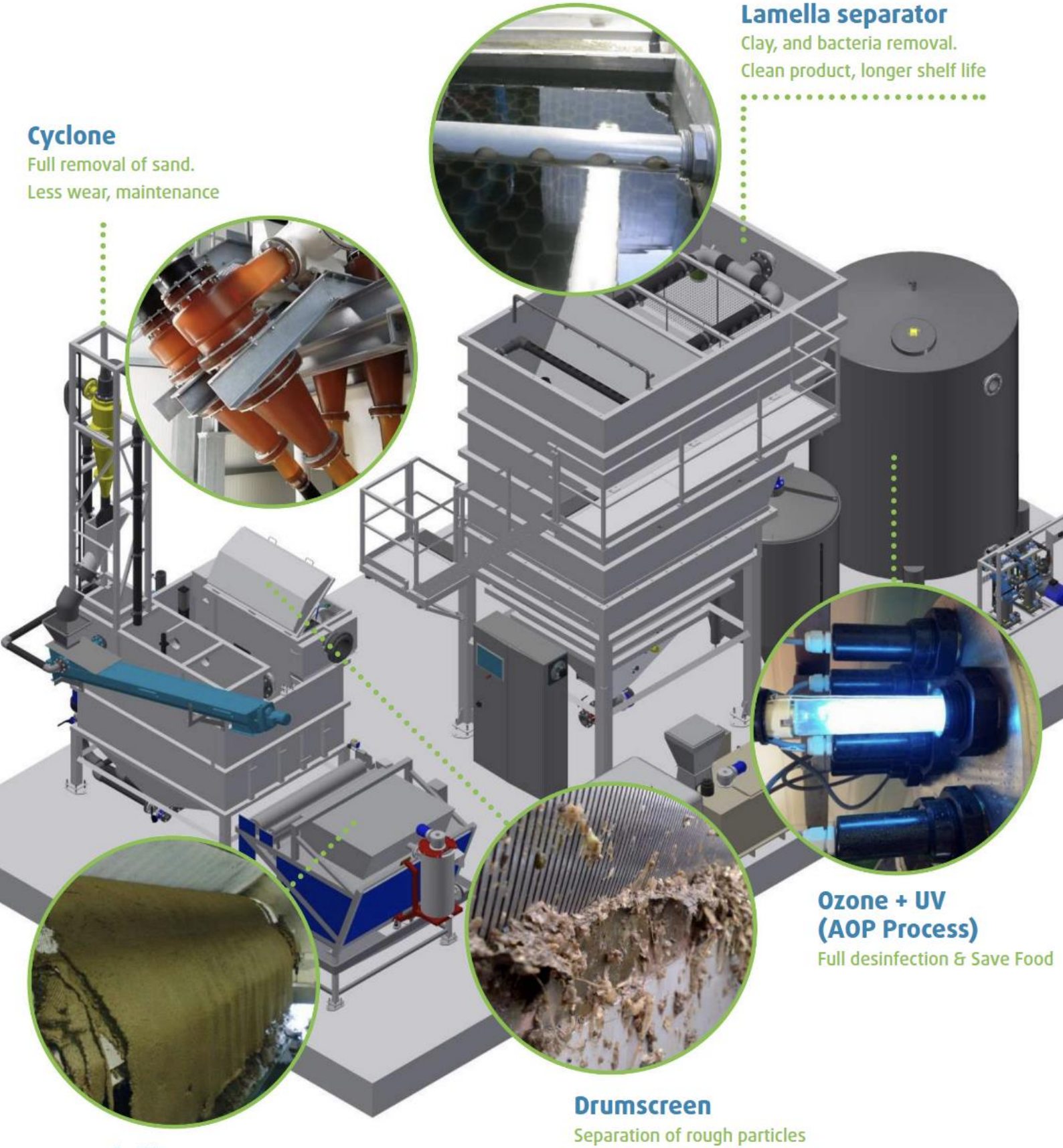
Todos los ensayos realizados en esta Actividad Demostrativa 'Mejora de la gestión del agua de las balsas de volcado de fruta (AIGUA.NET)', ref. Nº: 56 30045 2021 P4, han sido financiados a través de la Operación 01.02.01 de Transferencia Tecnológica del Programa de Desarrollo Rural de Catalunya 2014-2022, del 'Departament d'Acció Climàtica, Alimentació i Agenda Rural' de la Generalitat de Catalunya.

Agradecemos a las empresas que participaron en este proyecto su predisposición en todo momento a colaborar, a facilitar información y por poner a nuestra disposición sus instalaciones para poder realizar los muestreos en sus balsas de volcado.

Generalitat de Catalunya
Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca i Alimentació

Fons Europeu Agrícola de Desenvolupament Rural:
Europa inverteix en les zones rurals

VAM WaterTech
Refreshing Agrofood



For information, email: info@vam-watertech.com or visit www.vam-watertech.com

BLOQUE VI. PROYECTOS

6.1. ADOPTA - Adopción de nuevas tecnologías para la reducción de fitosanitarios. Drones y satélites para aplicación variable en viñedo y olivar

Participantes

E. Gil[2], F. Rovira-Más[1], A. Cuenca[1], V. Saiz-Rubio[1], C. Ortiz[1], E. Ortí[1], M. Pérez[1], A. Torregrosa[1], C. Román[1], R. Salcedo[2], F. García-Ruiz[2], J. Biscamps[2], E. Armengol[2], F. J. García-Ramos[3], M. Vidal[3], A. Vigo[3], G.L Blanco-Roldán[4], A. Rodríguez-Lizana[5], J. M. Mariscal[4]

[1] Universitat Politècnica de València (Valencia, España); frovira@dmta.upv.es

[2] Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España); emilio.gil@upc.edu

[3] Universidad de Zaragoza (Huesca, España); fjavier@unizar.es

[4] Universidad de Córdoba (Córdoba, España); ir3blrog@uco.es

[5] Universidad de Sevilla (Sevilla, España); arodriguez2@us.es

Resumen del proyecto

La viticultura y la olivicultura son dos pilares fundamentales de la agricultura española, aportando productos valiosos tanto para el mercado interno como para la exportación. Sin embargo, estos cultivos se enfrentan a numerosos desafíos en la actualidad, entre ellos su protección sostenible contra plagas y enfermedades. La estrategia de la Unión Europea "De la granja a la mesa" subraya la importancia de reducir el impacto ambiental y económico de la agricultura, promoviendo el uso sostenible de productos fitosanitarios. En este sentido, la pulverización variable puede ser clave para alcanzar estos objetivos, permitiendo un uso más eficiente de productos fitosanitarios (PPP). No obstante, la implementación práctica de

tecnologías inteligentes de pulverización variable es baja entre los agricultores de cultivos leñosos. El proyecto nacional PIVOS, antecesor del proyecto ADOPTA, demostró cómo la tecnología de modulación de ancho de pulso (PWM) para el control del caudal de las boquillas permitió reducir el uso de productos fitosanitarios y mejorar así la eficiencia de la pulverización. El proyecto ADOPTA consolida estos resultados para conseguir una adopción más amplia de esta tecnología, mostrando su valor a través de ensayos y demostraciones para fomentar la confianza entre los agricultores.

Objetivos del Proyecto ADOPTA

El objetivo principal del proyecto ADOPTA es mejorar el grado de adopción de nuevas tecnologías entre los agricultores de cultivos leñosos. Las plantaciones de olivo y viñedo, cultivos de gran importancia en la agricultura mediterránea, requieren una gestión eficaz de los productos fitosanitarios debido a los altos costes que representan y los desafíos ambientales asociados a su aplicación. Los objetivos específicos del proyecto incluyen:

1. **Automatización del proceso de creación de Mapas de Vegetación** utilizando sensores para teledetección, desde drones hasta imágenes satélite.
2. **Integración de boquillas PWM para la Aplicaciones de Dosis Variables** como una opción viable para variar la dosis de manera instantánea manteniendo constante el tamaño de gotas.
3. **Desarrollo de un Sistema Modular que facilite la adaptación de pulverizadores convencionales** para un uso más extendido de esta tecnología.
4. Cuantificación de la potencial **Reducción de productos fitosanitarios** derivada del uso de los prototipos desarrollados.
5. **Fomento de la Adopción** de tecnologías digitales entre los agricultores españoles a través de demostraciones en campo y con formación específica.

Resultados esperados

El proyecto se encuentra en fase de ejecución, con resultados prometedores en el control de mildiu en viñedo y de la polilla *Prays oleae* en olivo. Con la incorporación de tecnologías avanzadas, como la dosificación instantánea de la pulverización basada en el control de boquillas PWM, comandadas desde un mapa de vegetación, se espera lograr una reducción significativa en el uso de productos fitosanitarios sin comprometer la eficacia en el control de plagas. Además, también cabe esperar que la generación automática de mapas de vegetación, con información proveniente de sensores de teledetección, proporcione información valiosa para que los agricultores puedan tomar decisiones más acertadas, y por tanto, ayude a una mayor sostenibilidad y eficiencia en la gestión de los cultivos mediterráneos.

Más información

- Periodo de realización: 2023 – 2024 (en ejecución)
- https://pivos.upc.edu/inicio

6.2. AGRO-VAL - Nuevos desarrollos a partir de productos agrícolas para un sector primario sostenible

Participantes

El consorcio AGRO-VAL está formado por las empresas que se enumeran a continuación:

- Alhóndiga La Unión, líder del consorcio, es una empresa dedicada a la producción, comercialización y distribución de frutas y hortalizas tanto a granel como envasadas.
- Castillo de Canena, empresa dedicada a la explotación, producción y comercialización de aceites de oliva virgen extra.
- Troe, empresa especializada en la producción de compuestos y perfiles plásticos con alto contenido en cargas y fibras.
- Picda, empresa especializada en la fabricación de film flexible tanto de materiales convencionales como biopolímeros.
- Plásticos Ferrando, empresa líder en la fabricación de tuberías y mangueras en el mercado nacional.
- Inserplasa, empresa gestora de residuos, recicladora y especializada en la fabricación de cajas agrícolas por inyección a partir de material reciclado.

El consorcio se apoya en:

- El Instituto Tecnológico del Plástico (AIMPLAS), centro tecnológico de reconocido prestigio en el mundo del plástico focalizado sobre todo en el reciclado, la economía circular y las diferentes tecnologías de transformación
- La Estación Experimental Cajamar (Fundación Cajamar), centro tecnológico de referencia en agricultura intensiva mediterránea, desde donde se transfiere tecnología y conocimiento al sector y experto en la valorización de subproductos agrícolas.
- La Unidad de Microscopía Electrónica y Confocal y de Apoyo a las Especialidades Biológicas del área de infraestructuras de Investigación de la Universidad de Santiago de Compostela (USC), referente en la realización y evaluación de Ensayos eco toxicológicos en diferentes niveles tróficos

Resumen del proyecto

La economía circular y la bioeconomía son retos prioritarios para la Unión Europea que se presentan como una gran oportunidad para el sector agroalimentario. La valorización de los subproductos agrícolas, como aportación a la economía circular, permitirá incorporar productos de valor añadido a este sector teniendo en cuenta la gran cantidad de estos subproductos que actualmente se desechan; residuos hortofrutícolas, restos vegetales y residuos generados en la plasticultura.

Además, en los últimos años ha aparecido legislación relativa al respecto como el anteproyecto de Ley de Prevención de las Pérdidas y el Desperdicio Alimentario que entró en vigor el 2 de enero de 2023, donde el Gobierno ratifica su compromiso a reducir a la mitad el desperdicio de alimentos per cápita en el mundo. En otro Real Decreto 646/2020, ley de gestión de residuos, el objetivo es reducir los residuos municipales biodegradables destinados a vertedero y que estos no superen el 35 por 100 de los generados en 1995, incluyendo aquí los restos vegetales.

Por otro lado, y a pesar de que los plásticos agrícolas tienen un alto potencial de reciclaje, según APE Europe, actualmente sólo se recicla en la UE el 28%, mientras que el 42% se eliminan en vertederos y el 30% restante se envía a la recuperación de energía.

En este contexto, surge el proyecto AGRO-VAL donde se desarrollarán nuevos productos de alto valor añadido para el sector agroalimentario a partir de estos subproductos agrícolas, potenciando la economía circular. Se obtendrán nuevos compuestos, combinando estos subproductos entre ellos y con materiales convencionales y biodegradables en suelo, que deben ser procesables por las tecnologías convencionales de transformación y mantener e incluso mejorar las propiedades de los productos actuales.

Las actuaciones que se llevarán a cabo en el proyecto AGRO-VAL abarcan la valorización de estos tres tipos de subproductos agrícolas:

- Subproductos Hortofrutícolas: valorizando las pérdidas que se ocasionan durante la producción, manipulación y suministro, obteniendo aditivos naturales con propiedades antimicrobianas a partir de procesos de separación, extracción y/o purificación.
- Restos vegetales: incorporando estos subproductos agrícolas del sector de la aceituna con alto contenido en celulosa en diferentes matrices poliméricas y obteniendo productos plásticos más sostenibles.

- Films agrícolas al final de su vida útil. Valorización de este film agrícola con una metodología optimizada para recoger, acondicionar y reciclar este producto obteniendo materia prima.

Todas las empresas del consorcio AGRO-VAL han decidido unir sus esfuerzos y desarrollar nuevos productos sostenibles a partir de subproductos del sector agrícolas con la intención de anticiparse a la estrategia integral para valorizar estos subproductos y mejorar la imagen medioambiental del sector agrícola y los productos de plasticultura.

Estos productos serán una alternativa viable de acuerdo con la legislación medioambiental.

La siguiente tabla muestra en detalle los diferentes productos a desarrollar en el marco de AGRO-VAL y los objetivos técnicos específicos a alcanzar en cada uno de ellos, incluyendo la innovación tecnológica propuesta.

Empresa	Objetivos técnicos específicos
La Unión	Metodología de selección de los subproductos agrícolas procedentes de los residuos hortofrutícolas; extractos naturales y aditivos. Aumento de la persistencia en el medio de estos productos basándonos en la metodología de adsorción desarrollada en otros proyectos.
Castillo de Canena 1780	Investigar y definir una metodología adecuada para la recogida de los residuos vegetales del sector del olivar, y su acondicionamiento para su incorporación en las matrices poliméricas; biopolímeros y material reciclado. Obtención por prensado de piezas adecuadas para la comercialización del aceite de oliva.
TROE parques infan	Desarrollo de un material a partir de film agrícola reciclado, con alto contenido en restos vegetales y funcionalizado con extractos naturales, que sea procesable por la tecnología de extrusión de perfiles para su uso como símil madera.
picda	Desarrollo de un film agrícola acolchado biodegradable en suelo y funcionalizado con extractos naturales procedentes de residuos hortofrutícolas que le confieran propiedades antifúngicas y/o antimicrobianas.
Plásticos Ferrando	Desarrollo de tuberías de riego a partir de film agrícola reciclado y funcionalizado con extractos naturales obtenidos de residuos hortofrutícolas para darle propiedades antimicrobianas y/o antifúngicas durante su uso.
Inserplasa Reciclados & Inyección	Desarrollo de un material procesable por la tecnología de inyección para su uso como cajas funcionalizadas. Material obtenido a partir de material recuperado, PP reciclado y restos vegetales del cultivo del olivar que además podrá estar funcionalizado con extractos procedentes de los residuos hortofrutícolas

El proyecto AGRO-VAL ha sido cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER 2021-2027), con el objetivo de promover el desarrollo tecnológico, la innovación y una investigación de calidad. PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO EN COOPERACIÓN IDI-20230416

Más información

- Periodo de realización: 1 de abril de 2024 – 30 de abril de 2027

6.3. DESALICitrus - Manejo sostenible del agua marina desalinizada con alto contenido en boro para el riego en cítricos

Participantes

IVIA – Instituto Valenciano de Investigaciones agrarias

Resumen del proyecto

El **sector agroalimentario** constituye uno de los principales motores de la economía de la Comunitat Valenciana, en gran medida gracias a la **agricultura de regadío** que ocupa más del 50 % de las tierras de cultivo. Dentro de este sector, los **cítricos representan el 47 %** de la estructura de producción vegetal de la región, siendo el cultivo de mayor valor económico, social y cultural.

En las principales zonas citrícolas de la Comunitat, donde predomina el **clima semiárido**, las precipitaciones son escasas e irregulares, por lo que la disponibilidad de **agua para el riego** representa el principal **factor limitante** de la producción y rentabilidad del cultivo. Además, el aumento de las temperaturas y el descendo en las precipitaciones a causa del **cambio climático** están agravando esta situación, que conllevará inevitablemente a una **reducción de la disponibilidad de agua** para el riego, a una mayor sobreexplotación de los acuíferos, y con ello, a un deterioro de la calidad de las aguas, por lo que resulta indispensable la **búsqueda de nuevas fuentes** de agua para el riego.

En los últimos años, el **agua marina desalinizada** se postula como una fuente de agua importante para el riego, ya que es un **recurso hídrico i**nagotable y no sujeto a variables

climáticas, por lo que estratégicamente resulta idóneo para aumentar de forma sistemática la disponibilidad de recursos hídricos, especialmente en zonas deficitarias. Sin embargo, desde el punto de vista de su **uso para el riego agrícola**, el agua desalinizada pese a su baja salinidad presenta una serie de **inconvenientes agronómicos** asociados a desequilibrios en la concentración de ciertos elementos esenciales, mientras que otros elementos como el **boro** todavía se mantiene en concentraciones elevadas, que puede producir graves **daños por toxicidad** en cultivos sensibles como los cítricos.

En este contexto nace el **proyecto DESALICitrus**, que aborda los posibles riesgos y problemas relacionados con el **exceso de boro** que puede generar el riego con agua marina desalinizada en el **cultivo de cítricos**, teniendo en cuenta las posibles implicaciones tanto a nivel suelo como de planta. La hipótesis general de este proyecto es que el desarrollo de un modelo predictivo de la dinámica del boro en el sistema suelo-agua-planta y el uso de técnicas agronómicas, como el empleo de portainjertos tolerantes al exceso de boro y/o estrategias de Riego Salino Controlado (RSC), **puede mejorar la tolerancia** de los cítricos regados con agua desalada bajo condiciones semiáridas.

Los objetivos del proyecto DESALICitrus son:

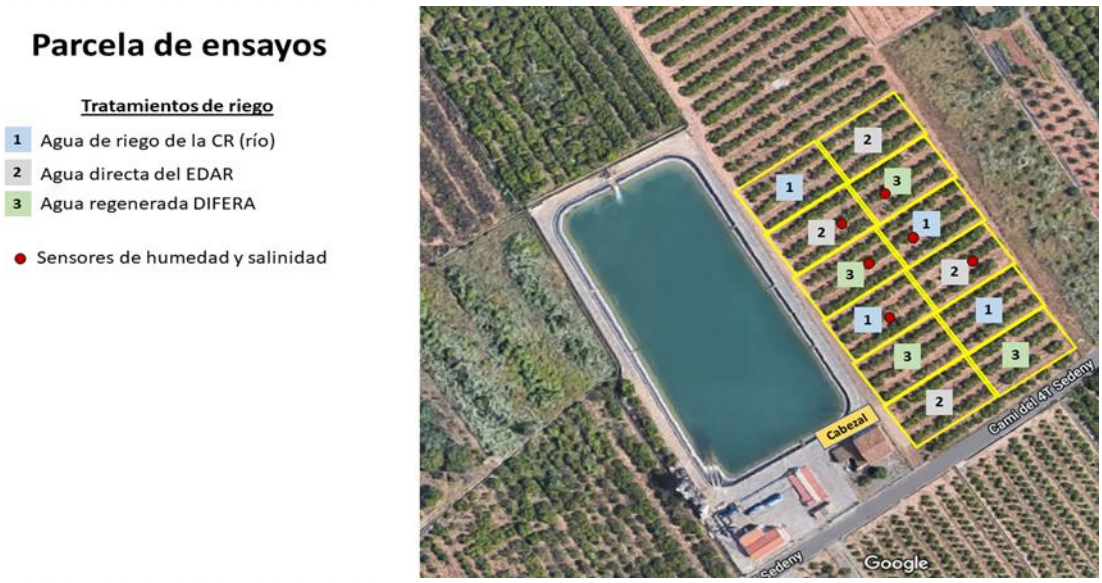
- Desarrollar un **modelo predictivo** de la dinámica de boro en el sistema suelo-agua-planta (SALTIRSOIL_B).
- **Validar el modelo** en condiciones de cultivo en cítricos regados con agua marina desalada.
- Evaluar las **alteraciones fisiológicas y agronómicas** que genera el uso de agua marina desalada en cítricos.
- Estudiar los mecanismos de **adaptación de dos portainjertos** de cítricos al riego con agua marina desalada.
- Evaluar el manejo estacional de aguas de diferente calidad agronómica (RSC) para **mejorar la respuesta del cultivo** de cítricos al riego con agua marina desalada.
- Determinar la **sostenibilidad económica y medioambiental** del uso de diferentes técnicas agronómicas para mejorar la respuesta de los cítricos al riego con agua marina desalada.
- Actualizar la herramienta DSS-SALTIRSOIL (portal web AGROSAL) con el modelo SALTIRSOIL-B para realizar recomendaciones de manejo del riego en cítricos con aguas con alto contenido en boro.

El proyecto dispone de un presupuesto de **108.900€** procedente del Programa Estatal de Generación de Conocimiento y Fortalecimiento Científico y Tecnológico del Sistema de I+D+i y del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad, en el marco del Plan Estatal de Investigación Científica y Técnica y de Innovación 2017-2020. La duración del proyecto es de **4 años** a contar desde el 1 de junio de 2020.

Más información

- Periodo de realización: Junio 2020-junio 2024

6.4. DIFERA - Digitalización agraria para la Fertirrigación y gestión de las Estaciones de Regeneración de Aguas



Participantes

- Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense S.A (FACSA). Coordinador del proyecto
- Universitat Jaume I de Castelló (UJI)
- Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)
- Unió de Llauradors i Ramaders del País Valencià (La Unió)
- Gimeno Digital Technologies S.L (GIDITEK)

Resumen del proyecto

La Comunidad Valenciana es la **segunda región** de España, tras las Islas Canarias**, con mayor porcentaje de superficie regada** respecto a su superficie cultivada, casi el 50 %, lo que supone poco más del 10 % de su superficie geográfica. Los cultivos principales de la Comunidad Valenciana en regadío pertenecen al grupo de los **cítricos**, naranjos y mandarinos.

En la provincia de **Castellón,** el cultivo de cítricos ocupa más de 34.000 ha, de las cuales la mayoría son **mandarinos y naranjo dulce**. La distribución de las explotaciones de cítricos está centrada principalmente en la zona costera, y mayoritariamente en la zona sur. El cultivo de cítricos es considerado de regadío y se estima un consumo medio de unos 5.000 m^3/ha en los mandarinos y cerca de 6.000 m^3/ha en naranjos. Esto provoca que la dotación anual para el cultivo de las explotaciones sea bastante elevada.

La demanda hídrica de los cítricos coincide con las **zonas de mayor aglomeración urbana**, por tanto, existe una **competencia** por los recursos entre las poblaciones y la agricultura. Competencia que se acentuará en el futuro si la reducción de recursos se incremente como es previsible. Pero es ahí donde la regeneración de agua de las **Estaciones de Depuración de Aguas**

Residuales (EDAR) puede jugar un papel clave, ya que la presencia de las mayores aglomeraciones urbanas también da pie a que las EDAR que tratan mayor volumen, también estén en el mismo lugar.

El **objetivo general** del proyecto consiste en el desarrollo de **un nuevo modelo integral de gestión con soporte digital para el agua regenerada**, potenciando su reutilización en agricultura y la fertirrigación. El proyecto DIFERA busca desarrollar un tratamiento para la **recuperación de agua de alta calidad para riego y fertirrigación** que mejore su calidad agronómica y optimice la gestión de las aguas regeneradas. Los procesos de digitalización de la información en combinación con los análisis agronómicos permitirán el desarrollo de protocolos innovadores de fertirrigación eficientes, mejorando el aprovechamiento óptimo del agua y minimizando los riesgos sobre el cultivo.

Para alcanzar este objetivo general se han desarrollado los siguientes **objetivos específicos:**

- Objetivo 1: Desarrollar un novedoso sistema de regeneración de aguas, incluyendo control de contaminantes emergentes y metales pesados y, la posterior utilización de nutrientes para fertirrigación.
- Objetivo 2: Desarrollar un nuevo sistema para estabilizar los cambios de calidad del agua regenerada para el riego.
- Objetivo 3: Diseñar nuevos protocolos de riego de precisión con aguas regeneradas en cítricos.
- Objetivo 4: Reducir la brecha digital en el proceso de riego y facilitar la toma de decisiones mediante la digitalización del proceso completo, incluyendo el nuevo tratamiento terciario, la disponibilidad de recursos hídricos, la calidad del agua, las condiciones climatológicas y las necesidades del cultivo.
- Objetivo 5: Aplicar la metodología analítica de screening de amplio espectro para la detección e identificación de metabolitos y/o productos de transformación.
- Objetivo 6: Determinar los efectos que genera el uso de agua depurada (con tratamiento secundario + desinfección) y regenerada (con el terciario agronómico) en suelo, planta y fruto, generando nuevos indicadores del estado de salud del cultivo y su calidad agronómica.
- Objetivo 7: Estudiar el coste-beneficio del riego con agua regenerada a las explotaciones citrícolas.
- Objetivo 8: Estudiar y desarrollar un nuevo sistema de gobernanza de la gestión de agua a través de nuevas políticas tarifarias y asignación de costes.
- Objetivo 9: Compartir el conocimiento generado para expandir y replicar un modelo de éxito en otros puntos de nuestro territorio de manera que se puedan reducir los plazos de adaptabilidad a estas nuevas instalaciones incluyendo su gestión organizativa y tarifaria.

El proyecto DIFERA cuenta con un **presupuesto total de 145.344,42 €.**

Más información

- Periodo de realización: septiembre 2022- septiembre 2024

6.5. DigitalRiego - Una nueva modernización del regadío valenciano basada en la digitalización y las nuevas tecnologías

Participantes y contacto

- Centro de Investigaciones sobre Desertificación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC-CIDE). Coordinador del proyecto
- AINIA
- Universitat Politècnica de València (UPV)
- Asdrón Spain (ASDRON)
- Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)
- Cooperativa de Anecoop S. Coop. (ANECOOP)

Resumen del proyecto

DigitalRiego es un proyecto colaborativo coordinado por el **Centro de Investigaciones sobre Desertificación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC-CIDE)** y en el que participan AINIA, la **Universitat Politècnica de València (UPV),** Asdrón Spain (ASDRON), el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) y la Cooperativa de Anecoop S. Coop. (ANECOOP).

Tiene como **objetivo general** incrementar la eficiencia en el uso del agua en parcela mediante la adopción de estrategias agronómicas para optimizar el riego. Dicho objetivo se pretende llevar a cabo desarrollando, a **nivel más científico**, un modelo para la programación del riego basado en determinaciones del estado hídrico de la planta mediante índices de vegetación que incluyen la termografía. El modelo **DigitalRiego** podrá aplicarse para distintas estrategias de riego, tanto óptimas como deficitarias, calculando la dosis de riego en función de previsiones meteorológicas

a corto plazo acopladas a algoritmos de cálculo de la evaporación del suelo y la transpiración de los cultivos.

La programación inicial basada en modelos se ajustará en función de determinaciones en parcela del estado hídrico de las plantas que permitirán tanto refinar la dosis de riego como a **nivel más tecnológico** establecer la variabilidad intra-parcelaria de cara a ajustar mejor el diseño agronómico del riego.

Los resultados de las programaciones obtenidas, al permitir calcular la **evapotranspiración real** del cultivo, y por tanto realizar un **balance de agua**, permitirán cuantificar la huella hídrica de las producciones de cara a desarrollar sellos de sostenibilidad.

Los desarrollos para llevar a cabo se testarán agronómicamente en los **principales cultivos de regadío** de la Comunitat Valenciana tanto leñosos (cítricos, caqui, vid y olivo) como hortícolas al aire libre (brócoli y sandía). La propuesta de DigitalRiego trata de **dar respuesta a más del 60 %** de la superficie regada de la Comunitat Valenciana.

Se emplearán distintas herramientas que permitan determinar el **estado hídrico** del cultivo como herramienta de apoyo a la **toma de decisiones**. Por un lado, se dispone de los métodos tradicionales que incluyen cámaras de presión (medida de potencial hídrico de tallo y hoja) y analizadores de intercambio gaseoso en hojas (medida de fotosíntesis y conductancia estomática). Y por otro, nuevas plataformas (vehículos aéreos no tripulados, como drones y avionetas, y plataformas satelitales) y sensores (cámaras hiperespectrales y térmicas) que permiten evaluar la variabilidad espacial y temporal de los cultivos mediante índices de vegetación.

Este proyecto tiene una duración de **3 años**, desde mayo del 2022 hasta septiembre del 2024, con un presupuesto total de **102.412,12 €.**

Más información

- Periodo de realización: mayo 2022 – septiembre 2024

6.6. Evaluación de distintas estrategias de manejo del riego para la optimización productiva del cultivo del aguacate en las condiciones de cultivo de Callosa d´en Sarrià

Participantes

- Cooperativa Agrícola de Callosa d´en Sarrià
- Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)

Resumen del proyecto

Este contrato de colaboración entre la **Cooperativa Agrícola de Callosa d'en Sarrià** y el propio **IVIA** nace de la oportunidad que ofrece el cultivo del **aguacate en la comarca de la Marina Baixa** como alternativa a los cítricos y al emblemático cultivo del níspero. Esta comarca cuenta con unas buenas condiciones climáticas y disponibilidad de agua en cantidad y calidad, lo que la convierte en una buena localización para el desarrollo de este cultivo.

El **objetivo principal de este convenio** es determinar el efecto sobre la productividad del aguacate de dos prácticas de cultivo: el aumento de la superficie mojada y la utilización de cubierta de malla. Como objetivo secundario, éste pretende establecer las bases para la introducción del riego de precisión en el cultivo del aguacate de la zona de influencia de la Cooperativa, para integrar la labor de asesoramiento de la Cooperativa en la corriente de digitalización tan presente hoy en la agricultura.

Para poder llevarlos a cabo, se dará continuidad a los ensayos que, en el marco del **Grupo Operativo del Aguacate**, se pusieron en marcha durante 2020 y 2021. En estos ensayos intervienen dispositivos de monitorización digital que ayudarán a la estimación precisa de las cantidades de agua a aplicar al cultivo, en especial aquellos instrumentos ligados a la termografía.

Ensayos de campo

1) Evaluación de superficie mojada

En anteriores ensayos se puso en evidencia la importancia de proporcionar al aguacate suficiente superficie mojada para que el desarrollo y la actividad radicular permitan un adecuado funcionamiento de la planta y ello resulte en una óptima producción del cultivo. En los trabajos realizados durante 2018 al 2020 se comprobó que un **aumento de goteros con caudales ultrabajos** permitieron unas producciones medias casi el doble que con un sistema de goteo tradicional. Esta **mejora en la productividad** tiene su origen en unas mayores tasas fotosintéticas originadas por una mejor distribución del agua y mayor equilibrio aire-agua en el suelo que dio como resultado un **mayor número de frutos recolectados**.

Es por ello que parece razonable seguir esta línea de trabajo yendo un paso más allá en el número de goteros y reduciendo más aún el caudal. Así pues, en este ensayo se aplican estos tratamientos de riego:

- T36: 3 laterales de riego con goteros de 1 l/h a 0,5 m, dando como resultado 36 goteros por árbol.
- T80: 4 laterales de riego con goteros de 0,6 l/h a 0,30 m, dando como resultado 80 goteros por árbol.

Con este ensayo se pretende alcanzar estos objetivos concretos:

- Determinación de pautas de riego eficiente para sistemas de riego con mayor número de goteros y de caudal ultrabajo.
- Evaluación de la influencia de la mayor superficie mojada en parámetros vegetativos y productivos del cultivo.
- Caracterización agronómica, ecofisiológica y termográfica del aguacate cultivado con un elevado número de goteros de bajo caudal.

2) Influencia de la utilización de cubierta de malla

El aguacate es una especie más adaptada a ambientes más boscoso de origen subtropical, por lo que las condiciones ambientales de la región mediterránea provocan que el cultivo sufra cierto estrés hídrico durante los meses estivales. A esto se le suma una elevada intensidad lumínica que puede favorecer la fotoinhibición, repercutiendo negativamente en la fotosíntesis. Por este motivo, el uso de una cubierta de malla que **reduzca los efectos del viento y una menor radiación** favorecerá que el cultivo se encuentre **hídricamente en mejores condiciones**. Además, es bien conocido en la zona que el uso de malla reduce la pérdida de calidad del fruto y su caída por efecto de los temporales de viento.

De este modo, se plantea en la parcela experimental la comparativa de los siguientes tratamientos:

- T1: Control. Plantación al aire libre.
- T2: Malla puntual. Plantación bajo malla únicamente durante el periodo invernal.
- T3: Malla permanente. Plantación bajo malla durante toda la campaña.

Con este ensayo se prenden alcanzar estos objetivos concretos:

- Definición de necesidades hídricas del cultivo bajo malla.
- Caracterización agronómica, ecofisiológica y termográfica del aguacate cultivado bajo malla.
- Evaluación y caracterización de los factores determinantes de la diferenciación productiva del cultivo por el uso de malla puntual y permanente.
- Estudio económico de la rentabilidad de esta estrategia de cultivo.

Más información

- Periodo de realización: 2022 - 2024

6.7. HANDYWATER - Herramientas de fácil uso para un manejo sostenible del riego en cultivos mediterráneos

Participantes

- IVIA -Coordinador del proyecto (España)
- ASDRON- Empresa valenciana de teledetección (España)
- UNICT- Universiad de Catania (Italia)
- IRRITEC- Empresa de riego (Italia)
- UFZ- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Alemania)
- IAK Agrar Consulting GmbH- Consultora especializada en agricultura (Alemania)
- BENHA- Universidad de Benha (Egipto)
- IAV- Instituto Agronómico y Veterinario Hassan II (Marruecos)
- UIZ- Universidad Ib Zohr (Marruecos)

Resumen del proyecto

Uno de los grandes desafíos de la agricultura de regadío es **optimizar el consumo de los recursos hídricos**, especialmente en áreas donde las dotaciones son inferiores a su demanda, como sucede **en la Comunitat Valenciana**. Ajustar los riegos a las necesidades reales de cada cultivo, en cada momento y lugar, sin comprometer su productividad, es posible y constituye una vía fundamental para aumentar de forma significativa la sostenibilidad socioeconómica y medioambiental de la agricultura de pequeñas explotaciones.

En este sentido, la Fundación **PRIMA** (Partnership on Research and Innovation in the Mediterranean Area) que está financiada por Horizonte 2020 en el Programa Marco de Investigación e Innovación de la Unión Europea, es una iniciativa en investigación e innovación que surge para desarrollar las soluciones necesarias para una gestión más sostenible de los recursos hídricos, crecimiento económico y estabilidad en el área mediterránea. A través de proyectos de I+D en un marco de cooperación euro-mediterránea, esta iniciativa tiene como objetivo desarrollar conocimientos y soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la producción de alimentos y la provisión de agua, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

El **Grupo de Riegos del Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA)** integrado por el Centro para el Desarrollo de la Agricultura Sostenible (CDAS) y el Servicio de Tecnología del Riego (STR), coordina el proyecto europeo de la convocatoria **PRIMA 2020 HANDYWATER -** "Herramientas de fácil uso para un manejo sostenible del riego en cultivos mediterráneos".

El **objetivo principal** del proyecto es el **desarrollo de nuevas herramientas de bajo coste y soluciones de apoyo para facilitar la adopción de tecnologías innovadoras de riego en el área mediterránea**. El fin último es que los pequeños agricultores integren en el manejo del riego estrategias de ahorro de agua con el fin de mejorar la sostenibilidad económica y medioambiental.

El proyecto parte de **tres ejes** que pretenden dar respuesta a las principales limitaciones a las que se enfrentan los pequeños productores:

- Eje 1: Análisis de limitaciones. Mediante un estudio del sector, se van a definir las principales limitaciones socioeconómicas y técnicas a las que se enfrentan los agricultores a la hora de modernizar sus instalaciones.
- Eje 2: Evaluación de estrategias. Se van a contrastar una serie de estrategias de manejo del riego para mejorar los outputs productivos en las explotaciones.
- Eje 3: Implementación de herramientas "low cost". Como elemento básico para determinar de una forma ajustada las necesidades hídricas de los cultivos y verificar el adecuado manejo del cutlivo, se fomentará el uso de herramientas de bajo coste para el control en continuo del sistema suelo-planta-atmósfera.

Para abordar este planteamiento, Riegos IVIA ha puesto en marcha **tres parcelas demostrativas** en colaboración con la **Cooperativa de Viver** (olivar) y **La rural Sant Vicent Ferrer de Benaguasil, Coop. V** (cítricos). Concretamente se están llevando a cabo los siguientes ensayos:

- Ensayo 1: Nuevos diseños agronómicos en naranja Valencia cv. 'Midknight'.
- Ensayo 2: Riego deficitario controlado en naranja Tarocco cv. 'Ippolito'.
- Ensayo 3: Riego subterráneo en aceituna cv. 'Serrana de Espadán'.

El consorcio del proyecto está compuesto por seis instituciones de investigación pertenecientes a cinco países: Alemania, Egipto, Italia, Marruecos y España. El proyecto se inició en junio de 2021, tiene una duración prevista de tres años y un presupuesto de 1.08 M€.

Más información

- Periodo de realización: junio 2021-junio 2024
- https://twitter.com/HandyWaterPRIMA
- https://www.ufz.de/handywater/

6.8. HidroSOStoneFruit - Estrategias hidroSOStenibles en frutales de hueso: Caso a estudio el albaricoquero

Participantes

- Francisca Hernández García (IP1)*
- Antonio José Signes Pastor (IP2)
- Esther Sendra Nadal
- Francisco Miguel Burló Carbonell
- Rafael Martínez Font
- David BernardoLópez Lluch
- Luis Noguera Artiaga
- Alejandro Galindo Egea
- Jesús García Brunton

* francisca.hernandez@umh.es

Resumen del proyecto

El objetivo global del proyecto se centra en el estudio y optimización de las necesidades hídricas del cultivo del albaricoque, como frutal de hueso, con el fin de: (i) reducir la huella hídrica y, (ii) mejorar la calidad funcional de los frutos. Una gestión sostenible de los recursos naturales tales como el agua agrícola es un reto actual. Es esperable que la restricción hídrica aplicada al cultivo del albaricoque durante periodos fenológicos clave desencadene la generación de metabolitos secundarios como respuesta al estrés fomentando las propiedades funcionales del fruto. La evidencia generada permitirá un avance significativo para la obtención de frutos de hueso más

sanos y saludables producidos en un entorno hidroSoStenible con creciente demanda de mercado.

Más información

- Periodo de realización: 1 de septiembre de 2022 – 29 de junio de 2025
- https://tonis81.github.io/HidroSOStoneFruit/

6.9. MEDPOME-STONE - Valorizing some pome and stone fruit germplasm variability to ensure resilience to climate change in the Mediterranean area

Participantes

- Dra. María José Rubio-Cabetas, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón (CITA), España (IP)
- Prof. Dr. Aydın Uzun, Erciyes University, Turquía
- Prof. Dr. Gaetano Distefano, University of Catania, Italia
- Prof. Dr. Ossama Kodad, National School of Agriculture of Meknès, Marruecos
- Prof. Dr. Adnane El Yaacoubi, University Sultan Moulay Slimane, Marruecos

Resumen del proyecto

Se propone una caracterización más detallada de la diversidad genética de especies silvestres de peral y almendro en la cuenca mediterránea a través de la identificación de variantes asociadas a caracteres de interés involucrados en la adaptación al cambio climático. Para ello, se establecerán colaboraciones entre agricultores y las partes interesadas poniendo en valor el conocimiento local y maximizando el impacto socioeconómico de los resultados a través de tres objetivos: (i) valorizar la diversidad genética en colecciones locales de Turquía, Italia y España para reducir la erosión genética en especies silvestres de peral y almendro; (ii) la selección de plantas adaptadas a condiciones de sequía crecientes; (iii) la identificación de marcadores moleculares vinculados a la tolerancia a la sequía. Con todo, se obtendrá un conocimiento más

preciso de la diversidad genética dentro de las accesiones en la región mediterránea; una producción más sostenible que promueva nuevos sistemas de cultivo basados en la biodiversidad; y nuevas herramientas de mejora para la selección asistida por marcadores (SAM) de variedades que muestren características de mejor adaptación a la sequía.

Más información

- Periodo de realización: 15 de mayo de 2022 – 15 de mayo de 2025
- Referencia PCI2022-133002
- Entidad beneficiaria: CITA-ARAGON

6.10. PIVOS - Pulverización Inteligente para un Viñedo y Olivar Sostenibles

Participantes

E. Gil[2], F. Rovira-Más[1], A. Cuenca[1], V. Saiz-Rubio[1], C. Ortiz[1], E. Ortí[1], M. Pérez[1], A. Torregrosa[1], C. Román[1], R. Salcedo[2], F. García-Ruiz[2], J. Biscamps[2], E. Armengol[2], F. J. García-Ramos[3], M. Vidal[3], A. Vigo[3], G.L Blanco-Roldán[4], A. Rodríguez-Lizana[5], J. M. Mariscal[4]

[1] Universitat Politècnica de València (Valencia, España); frovira@dmta.upv.es

[2] Universitat Politècnica de Catalunya (Barcelona, España); emilio.gil@upc.edu

[3] Universidad de Zaragoza (Huesca, España); fjavier@unizar.es

[4] Universidad de Córdoba (Córdoba, España); ir3blrog@uco.es

[5] Universidad de Sevilla (Sevilla, España); arodriguez2@us.es

Resumen del proyecto

En la agricultura mediterránea, especialmente en cultivos de alto valor como la viña y el olivo, la aplicación de productos fitosanitarios es de vital importancia para mantener la producción. Sin embargo, la adopción de nuevas tecnologías en este ámbito ha sido limitada en comparación con la utilizada en cultivos extensivos, resultando en un uso excesivo de fitosanitarios, un alto riesgo de contaminación ambiental debido a la deriva y la escorrentía, y un incremento en los costes operativos. Ante esta situación, el proyecto PIVOS propone el desarrollo y la implementación de un sistema inteligente de pulverización basado en dosificación variable para optimizar el proceso de aplicación de productos fitosanitarios en estos cultivos.

Objetivos del Proyecto

El objetivo general del proyecto es demostrar cómo la aplicación variable de productos fitosanitarios puede mejorar su deposición en la vegetación a tratar, manteniendo la eficacia biológica necesaria para el control de plagas y enfermedades, mientras reduce la cantidad de producto aplicado y por lo tanto los costes económicos y el impacto ambiental. Para lograr este fin, se establecieron los siguientes objetivos específicos:

1. **Caracterización Inteligente de la Vegetación** mediante sensores terrestres y aéreos para optimizar el procedimiento de creación de mapas de prescripción, con la finalidad de que se adapten mejor a la estructura y necesidades específicas de viñedos y olivares.
2. **Desarrollo de un Protocolos Estándar para codificar Mapas de Prescripción**, permitiendo así la generación de mapas de prescripción que indiquen el volumen de productos en cada momento, necesarios para una aplicación efectiva, sin depender de ningún fabricante.
3. **Automatización del sistema de actuación de Pulverizadores** para que sus boquillas puedan ser accionadas eléctricamente, ajustándose a mapas de prescripción previamente cargados por los agricultores y optimizando la cantidad de producto utilizado.
4. **Validación en Campo** bajo condiciones reales para verificar su efectividad y fiabilidad.
5. **Evaluación de Beneficios** agronómicos, económicos y ambientales derivados del uso de la tecnología desarrollada.

Resultados

Los resultados obtenidos hasta ahora son prometedores. Los ensayos de campo han demostrado que los prototipos de pulverizadores inteligentes para viñedo y olivar, basados en la modulación de ancho de pulso (PWM), ofrecen ajustes precisos en la aplicación variable de productos fitosanitarios. Esta tecnología permite controlar el volumen de producto aplicado ajustando la duración de las pulsaciones de apertura y cierre de las boquillas, para ejecutar en tiempo real los mapas de prescripción de dosis de productos fitosanitarios. Gracias a esta capacidad, los pulverizadores PIVOS pueden mantener la eficacia de un pulverizador convencional mientras reducen el consumo de productos fitosanitarios y agua en un 15-25 %. Además, con estos sistemas se ha conseguido aumentar la capacidad de trabajo de los pulverizadores en un 17 %, lo que implica una mejora significativa en la eficiencia operativa al cubrir más área de cultivo en menos tiempo. Estos avances no sólo promueven una mayor adopción de buenas prácticas agrícolas, sino que también ofrecen una ruta hacia una agricultura más respetuosa con el medio ambiente. El proyecto PIVOS apoya la innovación tecnológica en la agricultura actual, demostrando cómo las soluciones inteligentes pueden reducir impactos negativos mientras maximizan la productividad y sostenibilidad de los cultivos de gran valor en el Mediterráneo, como la viña y el olivar.

Más información

- Periodo de realización: 2020 – 2024
- https://pivos.upc.edu/inicio

6.11. Prácticas agronómicas para el control de la incidencia de la Tinta provocada por *Phytophthora* spp. en cultivos de castaño con riego del norte de Extremadura

Participantes

Paula Serrano Pérez[1], Mª del Henar Prieto Losada[1], Elena Nieto Serrano[1], Gerardo Moreno Marcos[2], Mikel Cebadero[1], Mª del Carmen Rodríguez Molina[1]

[1] Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Extremadura (CICYTEX)

[2] INDEHESA_Universidad de Extremadura

paula.serranop@juntaex.es

Resumen del proyecto

Las plantaciones y bosques de castaño son fundamentales tanto para el paisaje como para el patrimonio cultural de las áreas donde se encuentran y tienen una elevada importancia económica por la producción de su fruto y la calidad de su madera. Su gestión adecuada puede ayudar a conservar la biodiversidad, proteger el suelo y el agua, y mitigar el cambio climático, proporcionando servicios ecosistémicos importantes para la salud del medio ambiente y la sociedad.

La superficie cultivada en España ha crecido notablemente desde 2008, alcanzando 38.470 hectáreas en 2022, según FAOSTAT y la producción todavía no cubre la creciente demanda mundial de castañas. Sin embargo, existe una notable falta de información sobre el comportamiento del castaño como cultivo, consecuencia de la tendencia regresiva que sufrió en Europa en décadas pasadas. Actualmente, el aumento de las necesidades hídricas de los cultivos debidas al cambio climático, el uso de variedades más productivas y la mejora y modernización de las instalaciones de regadío en las zonas de montaña, hacen que el riego se esté estableciendo como una técnica agronómica habitual en las plantaciones de castaño. El cambio climático y la intensificación del cultivo están propiciando las condiciones favorables para la dispersión y el aumento en la incidencia de la Tinta del castaño. Esta enfermedad, causada por el oomiceto *Phytophthora* spp., es una de las más graves del castaño europeo (*Castanea sativa* Mill) y es especialmente preocupante en la zona norte de Cáceres, siendo uno de los problemas que ha planteado el sector en las diferentes reuniones de la Mesa del Castaño de Extremadura, perteneciente a la Red Estatal del Castaño. Esta enfermedad presenta síntomas secundarios en los árboles originados por la falta de absorción de agua y nutrientes por las raicillas infectadas. Se sabe que el ciclo de vida de *Phytophthora* spp. está estrechamente ligado a la presencia de agua en el suelo, por lo que el adecuado manejo del riego es una cuestión clave.

El proyecto, financiado por el Plan Regional de Investigación de la Junta de Extremadura (IB20136) y fondos FEDER, ha intervenido en los tres aspectos fundamentales relacionados con la enfermedad de la Tinta del castaño: la mejora de las propiedades físico-químicas del suelo, la disminución del inóculo en el suelo y el fortalecimiento del árbol, y su desarrollo ha logrado avances significativos y tangibles, con importantes proyecciones socioeconómicas. En primer lugar, se han evaluado diferentes tratamientos de riego en el castaño, optimizando la cantidad de agua utilizada y permitiendo la supervivencia de los castaños afectados por la enfermedad de la tinta. Esto mejora la sostenibilidad y la eficiencia hídrica en las plantaciones, reduciendo la incidencia de *Phytophthora* spp. al controlar mejor la humedad del suelo. La técnica de riego conocida como secado parcial de raíces (PRD) ha sido efectiva para reducir la actividad del patógeno en condiciones controladas, proporcionando una alternativa de riego sostenible para el manejo de la enfermedad. Esta técnica no solo contribuye al control de la enfermedad, sino que también promueve un uso más eficiente del agua.

Por otro lado, la aplicación de fosetil-aluminio mediante inyección al tronco ha demostrado ser eficaz en el control de la enfermedad de la tinta. Esta alternativa añade una herramienta valiosa en el manejo integrado de la enfermedad, mejorando la salud y la productividad de los castaños. El fosetil-aluminio actúa fortaleciendo las defensas naturales del árbol contra el patógeno, complementando otras estrategias de manejo.

También se ha estudiado el efecto de las enmiendas cálcicas, como el sulfato y el silicato cálcicos, en el control de la enfermedad. Estas enmiendas han modificado las propiedades físico-químicas del suelo, haciéndolo menos favorable para el patógeno. Tanto el silicato cálcico como el sulfato cálcico pueden contribuir a reducir la severidad de la enfermedad de la tinta del castaño, aunque no de una manera drástica. Por lo tanto, su aplicación al suelo puede ser recomendada dentro de un programa de manejo integrado de la enfermedad,

ofreciendo una solución económica y efectiva para los agricultores y contribuyendo a la salud del suelo.

Los avances de este proyecto, llevado a cabo por especialistas de diferentes disciplinas de dos organismos diferentes: INDEHESA y CICYTEX, ha contribuido al avance en el manejo de la enfermedad de la tinta del castaño

Más información

- Periodo de realización: 17 de junio de 2021 – 16 de junio de 2024

6.12. REFEX - Transferencia de buenas prácticas resultantes de trabajos consolidados de investigación para promover la gestión eficiente de los regadíos en Extremadura

Participantes y contacto

Mª del Henar Prieto Losada*; Mª José Moñino Espino; David Uriarte Hernández; Juan Manuel Pérez Rodríguez; Carlos Campillo Torres; Fernando Blanco Cipollone; Elena Nieto Serrano

henar.prieto@juntaex.es

Resumen del proyecto

Este proyecto surge como un encargo de la Consejería de Agricultura Desarrollo Rural y Poblaciones de la Junta de Extremadura en el año 2022 y ha sido y es supervisado por el Servicio de Regadíos y está cofinanciado con fondos FEADER. El convenio que ha puesto en marcha este proyecto se formalizó en el año 2022 y las actuaciones finalizarán en el año 2024.

El proyecto REFEX tiene como principal objetivo transferir resultados de investigación e innovaciones dirigidas al uso eficiente de los recursos hídrico en los regadíos a las explotaciones de regadíos y comunidades de regantes de Extremadura. Consta de un total de 7 actuaciones

que abarcan desde propuestas para optimizar el uso del agua en parcelas utilizando tecnologías avanzadas, y adaptación a dotaciones reducidas en el caso de olivar y viñedo, hasta evaluaciones del uso del agua en condiciones reales y guías para tomas de decisiones. La base de trabajo son 18 parcelas demostrativas de olivar, viñedo y frutales de hueso e inicialmente 2 comunidades de regantes, una en las Vegas del Guadiana y la otra en los regadíos de montaña del norte de Cáceres. Los trabajos en comunidades de regantes se han ampliado hasta un total de 5 a petición de estas. Adicionalmente se realiza un estudio para cuantificar el impacto de las explotaciones de regadío de Extremadura de cara a proponer opciones de mejora utilizando como base la herramienta informática SimaPro. Finalmente se incluye un estudio de posibles medidas a adoptar en situaciones de sequía, que tiene como base la revisión de la información disponible en bibliografía y recopilar experiencias de distintos grupos de investigación. Un aspecto fundamental del proyecto son las actividades de formación y transferencia.

Más información

- Periodo de realización: 2022 – 2024
- http://estrategiaagros.es/

6.13. VEGE-PACK - Envases compostables (FILM y MALLA) funcionalizados con productos procedentes de residuos vegetales

Participantes

El consorcio VEGE-PACK está liderado por la empresa L´ALHONDIGA – LA UNION que se dedica a la producción, comercialización y distribución de frutas y hortalizas, siendo el resto de las empresas; ECOPLAS, empresa dedicada a la fabricación de envases para productos agrícolas tipo malla y MORERA Y VALLEJO, empresa dedicada a la fabricación de film para diferentes usos, entre ellos el envasado de productos agrícolas.

Todas estas empresas han decidido continuar trabajando juntas para desarrollar envases compostables funcionalizados con productos procedentes de residuos vegetales y conseguir propiedades antifúngicas, antimicrobianas y/o anti germinativas aprovechando los buenos resultados obtenidos al utilizar otros subproductos agrícolas como suplementos vitamínicos, colorantes alimentarios, en diferentes alimentos en el proyecto BIOVEGE.

En este caso el consorcio descrito pretende extraer dichos aditivos funcionales de subproductos agrícolas para introducirlos en nuevos compuestos desarrollados a partir de biopolímeros comerciales que sean adecuados para ser procesables por las técnicas convencionales de extrusión requeridas y obtener envases compostables de alto valor añadido para alargar la vida útil del producto envasado.

Resumen del proyecto

El objetivo principal de VEGE-PACK es desarrollar envases compostables basados en films y mallas con propiedades antimicrobianas, antifúngicas y/o antigerminativas, al incluir en la

matriz del biopolímero los aditivos funcionales obtenidos de las fracciones de interés de los subproductos de la chirimoya y/o el aguacate con la intención de obtener:

- Film para el envasado segunda piel en pepinos y calabacines.
- Film para el envasado Flow pack de productos hortofrutícolas.
- Mallas orientadas y no orientadas para el envasado de productos hortofrutícolas.

Estos envases además de cumplir con la Directiva 94/62/CE relativa a los envases y residuos de envase y sus modificaciones en la Directiva (UE) 2015/720, permitirán mantener y/o alargar la vida útil de los productos envasados debido a su funcionalización con los productos descritos.

Objetivos técnicos específicos

1. Definición de las especificaciones técnicas de cada uno de los envases a desarrollar.
2. Extracción y selección de los aditivos funcionales a partir de subproductos agrícolas.
3. Selección de materiales biodegradables de partida, teniendo en cuenta el estado actual de la técnica.
4. Modificaciones fisicoquímicas de los biopolímeros comerciales para alcanzar los requerimientos definidos desde el punto de vista de las tecnologías de procesado
5. Acondicionamiento de los aditivos y su incorporación a la matriz polimérica.
6. Investigación a realizar para definir los procedimientos óptimos que permitan evaluar en cada caso de estudio la funcionalidad de los aditivos incorporados.
7. Desarrollo de los nuevos grados de polímeros funcionalizados y compostables, adecuados para la obtención de los diferentes envases descritos en los casos de estudio
8. Obtención de los envases definidos en los casos de estudio incluyendo los procesos de "converting": plegado, sellado, retractilado y finalmente el envasado.
9. Evaluación de la funcionalidad de los aditivos y viabilidad técnica de cada uno de los envases obtenidos durante toda la vida útil del producto envasado.
10. Evaluación de la compostabilidad del nuevo envase biodegradable adecuada para el envasado de productos hortofrutícolas según norma UNE-EN 13432.

Más información

- Periodo de realización: Julio de 2019 – Julio 2022

LISTA DE AUTORES

ABADIAS SERO, MARIBEL

Maribel Abadias es Doctora en Ciencia y Tecnología de Alimentos por la Universidad de Lleida (UdL), investigadora en el Programa Poscosecha del IRTA (Fruitcentre) desde 2002. Especializada en microbiología de frutas y hortalizas frescas y procesadas y en riesgos microbiológicos asociados al uso de agua en el manejo poscosecha y procesado de frutas y vegetales. Investiga la incidencia de patógenos alimentarios y métodos para reducir la contaminación microbiológica de alimentos y aguas de procesado de manera segura y sostenible. Ha participado en más de 30 proyectos de investigación y ha publicado más de 100 articulos en revistas de impacto internacional. Ha dirigido 5 tesis doctorales. Participa en actividades de divulgación y transferencia.

Contacto: isabel.abadias@irta.cat

ACOSTA ROSA, SARA

Sara Acosta es Graduada en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (2019) por la UdL. Ha trabajado en el Programa de Poscosecha del IRTA en el Fruitcentre dentro del grupo de Frutas y Hortalizas Procesadas y del Servicio Técnico de Poscosecha como técnica de laboratorio en diferentes proyectos relacionados con métodos de desinfección del agua en centrales frutícolas y tratamientos para el control de podredumbres.

Contacto: postcollita@irta.cat

ALÒS SAIZ, NATÀLIA

Natàlia Alòs es Ingeniero Técnico Agrícola (2003) y Licenciada en Ciencia y Tecnología de los Alimentos (2006) por la UdL. Desde el año 2007 trabaja en el IRTA, en el Servicio Técnico de Poscosecha (STP), asesorando a empresas del sector, especialmente centrales hortofrutícolas de fruta de pepita y fruta de hueso. Se especializa en poscosecha, desde la limpieza y desinfección, conservación frigorífica, tratamientos poscosecha, uso de atmósfera dinámicas y transporte ultramar. Ha participado en jornadas de transferencia y cursos de divulgación.

Contacto: natalia.alos@irta.cat

BAEZA CANO, RAFAEL

Rafael Baeza Cano es Técnico especialista principal del área de Recursos Naturales y Forestales en el Centro IFAPA "La Mojonera" de Almería. Desde 2013, Coordinador de la transferencia de tecnología al regadío del IFAPA (SAR-IFAPA).

Contacto: rafaelj.baeza@juntadeandalucia.es

BALBASTRE PERALTA, IBAN

Iban Balbastre Peralta es Doctor Ingeniero Agrónomo y Profesor Titular en la UPV desde 2000 en Ingeniería Agroforestal, imparte clases en los grados de Ingeniero Agrónomo, Ingeniero de Montes y el Máster de Ingeniero Agrónomo. Su docencia se enfoca en ingeniería hidráulica y sistemas de riego a presión. Dirige el Laboratorio de Hidráulica y Riegos (LHIR-UPV) y participa en múltiples proyectos de investigación. Sus áreas de interés incluyen la caracterización de elementos hidráulicos, diseño de sistemas de riego a presión, detección de anomalías en redes hidráulicas, control de agua, sistemas de información geográfica (SIG), energía solar, bombeo fotovoltaico y riego de precisión.

Contacto: ibbalpe@agf.upv.es

BIELSA, BEATRIZ

Beatriz Bielsa es Doctora en Ciencia y Tecnología Agraria y Alimentaria por la UdL e Ingeniera Agrónoma por la UNIZAR, es investigadora en el Departamento de Ciencia Vegetal del CITA. Se especializa en la mejora genética del almendro y portainjertos Prunus, desarrollando materiales para sistemas intensivos. Su investigación abarca la selección de variedades autocompatibles y patrones híbridos de bajo vigor, resistentes a estreses abióticos y bióticos, y el desarrollo de marcadores moleculares para la resistencia a nematodos. Realizó estancias en el USDA y la Universidad de California, Davis, estudiando la tolerancia a la sequía. Ha participado en 18 proyectos de investigación y es autora de 12 artículos JRC, un capítulo de libro, 10 publicaciones técnicas y 40 comunicaciones en congresos.

Contacto: bbielsa@cita-aragon.es

BONET PÉREZ DE LEÓN, LUIS

Luis Bonet Pérez de León es Ingeniero Agrónomo y director del Servicio de Tecnología del Riego (STR) en el IVIA. Ha promovido la eficiencia en el uso del agua de riego en cultivos leñosos y hortícolas. Responsable de la red de estaciones agrometeorológicas (SIAR), calcula la Evapotranspiración de Referencia (ETo) y aplica la metodología del balance de agua. Colabora en proyectos de riego, centrándose en necesidades hídricas, estrategias de riego deficitario y la implementación de sistemas de riego subterráneo y microaspersión. Su experiencia en evaluación hídrica del suelo y las plantas lo destaca como experto en la Comunidad Valenciana

Contacto: bonet_lui@gva.es

BUESA PUEYO, IGNACIO

Ignacio Buesa Pueyo es Doctor Ingeniero Agrónomo y máster en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente por la UPV, especializado en gestión de cuencas. Ha trabajado en instituciones como el CEBAS-CSIC y el ISVV-INRA. Actualmente, es investigador posdoctoral en el CIDE-CSIC en Valencia. Su investigación se centra en relaciones hídricas y ecofisiología de especies leñosas, buscando mejorar la eficiencia del uso del agua en cultivos mediterráneos. Ha presentado 69 trabajos en congresos, publicado 45 artículos científicos y participado en 20 proyectos.

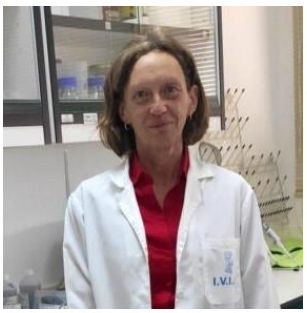
Contacto: igbuepue@gmail.com

CABELLO POZO, DIEGO

Diego Cabello es Ingeniero Agrónomo por la UCO, realizó su TFC sobre la Moniliosis del membrillero, primera descripción de esta enfermedad en España. Desde 2009, trabaja en el grupo AGR 157-Pomología (grupo UCOLIVO), enfocándose en la mejora y evaluación de variedades de olivo. Responsable técnico del programa de mejora del olivo UCO-IFAPA y lideró la línea 10 del Proyecto Innolivar. Su tesis doctoral abordó las necesidades de frío del olivo. Ha publicado numerosos estudios y presentado en congresos, destacándose por sus importantes contribuciones al cultivo del olivo en seto.

Contacto: cabello@uco.es

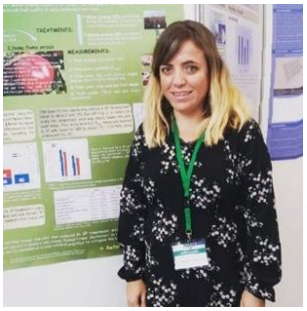
CALATAYUD CHOVER, ÁNGELES



Ángeles Calatayud es Doctora en Ciencias Biológicas por la UV. Se incorporó al IVIA en 2004 y actualmente es Investigadora Principal y dirige el grupo de Horticultura del IVIA. Ha dirigido 6 tesis doctorales y cuenta más de 77 publicaciones SCI, 2438 veces citadas y un índice h de 27. Las principales líneas de investigación están centradas en la obtención de patrones de pimiento tolerantes a los estreses abióticos, el fenotipado y evaluación de la calidad nutricional de variedades hortícolas valencianas y la recuperación del cultivo del boniato.

Contacto: calatayud_ang@gva.es

CONESA SAURA, Mª ROSARIO



Mª Rosario Conesa Saura es Doctora Ingeniera Agrónoma por la UPCT y desde 2018 es investigadora postdoctoral Juan de la Cierva en el Departamento de Riego del CEBAS-CSIC. Se especializa en la optimización del riego en condiciones de escasez hídrica, aplicando estrategias de RDC y biosensores. Ha participado en 14 proyectos de investigación. Realizó estancias en la Universidad de Lancaster y el CREA-OF. Con un índice h de 17, es coautora de 40 publicaciones científicas. También ha trabajado como consultora externa en instituciones de Bélgica, Chile y Uruguay, obteniendo 5 becas competitivas y 3 premios de investigación.

Contacto: mrconesa@cebas.csic.es

COSTA SANAGUSTÍN, ELENA

Elena Costa es Licenciada y Doctora en Ciencia y Tecnología de los Alimentos por la UdL. Desde 2002 trabaja en el IRTA, en el STP, asesorando a empresas del sector, especialmente centrales hortofrutícolas de fruta de pepita y hueso, en aspectos de poscosecha como conservación, tratamientos y uso de atmósferas dinámicas. Ha publicado más de 20 artículos en revistas científicas y nacionales y ha participado en jornadas de transferencia y cursos de divulgación. También ha colaborado en proyectos científicos internacionales y contratos con empresas, aportando su experiencia al desarrollo del sector.

Contacto: elena.costa@irta.cat

FERRER VILLAR, JOSÉ MARÍA

José María Ferrer Villar es Licenciado en Derecho y Especialista en Derecho Alimentario, cuenta con más de 20 años de experiencia en Legislación Agroalimentaria. Desde 2000 hasta 2023, fue Responsable del Departamento de Derecho Alimentario de AINIA, con amplia experiencia en etiquetado y información al consumidor. Coordina proyectos de la iniciativa BTSF de la Comisión Europea, promoviendo la legislación alimentaria en Europa, Sudamérica, América Central y África. Además, es miembro del EFI-Food-Law-Group, AIDABA, el Grupo de Nanotecnología de Aecosan y la Red Nacional de Riesgos Emergentes

Contacto: jmferrer@ainia.es

FORNER GINER, MARÍA ÁNGELES

María Ángeles Forner-Giner es Doctora Ingeniera Agrónoma por la UPV. Actualmente, es Coordinadora del Centro de Citricultura y Producción Vegetal e Investigadora Principal en el grupo de Patrones de cítricos del IVIA. Dirige un programa de mejora de materiales tolerantes a estreses abióticos, centrándose en la productividad, calidad de la fruta y sostenibilidad de la industria citrícola en España. Ha dirigido 4 tesis doctorales y cuenta con 62 publicaciones, 10 capítulos de libros y 21 nuevos híbridos de patrones. Ha liderado más de 14 proyectos de investigación y participado en más de 70 conferencias.

Contacto: forner_margin@gva.es

GALLEGO ELVIRA, BELÉN

Belén Gallego Elvira es Ingeniera Agrónoma, Doctora y Profesora titular de la UPCT en Ingeniería Agroforestal. Realizó una investigación postdoctoral en el INRA (Francia) y en el CEH (Reino Unido). En 2018, se unió al Grupo de Investigación "Diseño y Gestión en Agricultura de Regadío" de la UPCT. Entre 2020 y 2023, fue investigadora distinguida, financiada por el programa Beatriz Galindo. Su investigación se centra en la gestión del agua en la agricultura, teledetección para el seguimiento de la vegetación y evaluación de la sostenibilidad de agrosistemas.

Contacto: belen.gallego@upct.es

GAVILÁN, PEDRO

Pedro Gavilán es Investigador titular del Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA). Doctor por la Universidad de Córdoba y miembro del grupo @riegosostenible del IFAPA, con 30 años de experiencia en investigación, experimentación, transferencia y formación en el manejo de los sistemas de riego, con el objetivo fundamental de aumentar la eficiencia en el uso del agua y de los fertilizantes. En los últimos años ha liderado el proyecto de la mejora de la eficiencia del riego de los frutos rojos en la provincia de Huelva.

Contacto: pedrod.gavilan@juntadeandalucia.es

GIL, MARÍA ISABEL

La actividad investigadora de María Isabel Gil se ha centrado en el estudio de peligros microbiológicos asociados al uso del agua en el acondicionamiento y procesado de frutas y hortalizas enteras, frescas cortadas o congeladas. Además, cuenta con una gran experiencia en medidas de prevención y estrategias de intervención incluida la desinfección del agua en centrales hortofrutícolas y plantas de procesado y su impacto en la seguridad de las frutas y hortalizas.

Contacto: migil@cebas.csic.es

GIL MOYA, EMILIO

Emilio Gil es Catedrático en la Universidad Politécnica de Cataluña y Director del Grupo de Investigación de Maquinaria Agrícola, cuenta con más de 35 años de experiencia en tecnologías de pulverización para cultivos arbóreos y viñas. Ha sido profesor en la Universidad de Cornell (EE.UU.) y es miembro experto de varios Grupos de Trabajo de ISO sobre pulverización. Destacan sus numerosas publicaciones científicas y el "Manual de Inspecciones de Equipos de Aplicación de Fitosanitarios", en colaboración con el Ministerio de Agricultura. Es creador de la App Dosaviña, que ajusta dosis de fitosanitarios en viñedos, y ha asesorado a gobiernos de Serbia, Chile, Chipre y España en la implementación de la Directiva de Uso Sostenible. Coordina proyectos europeos como HE RENOVATE y el programa BTSF (Better Training for Safer Food), además de ser coordinador del área de equipos para tratamientos en frutales y cítricos en EUPAF.

Contacto: emilio.gil@upc.edu

GIRARDI, EDUARDO AUGUSTO

Eduardo Augusto Girardi es Investigador de Embrapa Mandioca y Fruticultura y coordinador de la Unidad Mixta de Investigación y Transferencia de Tecnología UMIPTT Cinturón Citrícola entre Embrapa, Coopercitrus/FUPAB y el Fondo de Defensa de la Citricultura-Fundecitrus. Es profesor permanente del Programa de Posgrado en Producción Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrarias y Veterinarias de la Universidad Estatal Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Es becario de productividad en investigación PQ2 del CNPq. Ha impartido diversas conferencias en eventos nacionales e internacionales, coordinado proyectos de investigación con financiamiento público y privado, publicado 98 artículos científicos en revistas indexadas y participado en el registro de 24 cultivares de cítricos. Trabaja en la selección de variedades de copa y portainjerto de frutales, resistencia genética y manejo del HLB, y en sistemas de producción y propagación más sostenibles para la citricultura.

Contacto: eduardo.girardi@embrapa.br

GIRONA GOMIS, JOAN

Joan Girona es Ingeniero y Doctor en Agronomía, con un MSc en Horticultura por UC Davis. Investigador científico en el IRTA desde 1982, se especializa en la relación planta-agua, el uso eficiente del agua en la agricultura y el riego deficitario controlado. Ha publicado más de 85 artículos científicos, dirigido 11 tesis doctorales y organizado congresos internacionales sobre riego. Además, ha colaborado con diversas comunidades de regantes y grupos científicos internacionales, y tiene experiencia en proyectos de investigación en varios países. Es delegado institucional del IRTA en las Tierras de Lleida y Pirineos.

Contacto: Joan.Girona@irta.cat

GISBERT-MULLOR, RAMÓN

Ramón Gisbert-Mullor es Doctor Ingeniero Agrónomo por la Universitat Politècnica de València (UPV) desde 2023. Tras obtener el Grado de Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural y el Máster en Ingeniería Agronómica, consiguió una beca FPU para cursar los estudios de doctorado. Actualmente desempeña su trabajo en el Centro Valenciano de Estudios sobre el Riego (CVER) de la UPV. Su actividad investigadora está centrada principalmente en la búsqueda de tolerancia a estreses abióticos mediante el uso de la técnica del injerto hortícola.

Contacto: ragismul@etsiamn.upv.es

GONZÁLEZ PAVÓN, CÉSAR

César González Pavón es Doctor Ingeniero Agrónomo por la UPV (2023) y profesor del área de Física Aplicada desde 2022. Imparte docencia en primer ciclo en asignaturas de Física en las Escuelas de Ingeniería Agronómica e Ingeniería de Telecomunicaciones. Su investigación se ha desarrollado en el ámbito de la ingeniería del riego y los sistemas de información geográfica donde también desarrolla mi tarea profesional fuera del ámbito universitario. Ha participado en varios proyectos de investigación relacionados con este ámbito y tiene diversas publicaciones científicas en JCR.

Contacto: csagonpa@fis.upv.es

IGLESIAS CASTELLARNAU, IGNASI

Ignasi Iglesias es Director Técnico en Agromillora Group. Ha sido investigador en el Instituto de Investigación y Tecnología Agroalimentaria (IRTA) durante 24 años. Anteriormente, trabajó como extensionista en el Departament d'Agricultura de la Generalitat de Catalunya. Su actividad científica se ha centrado principalmente en la evaluación del material vegetal, así como de sistemas de conducción en diferentes especies de fruta dulce, fruta seca y cítricos, así como su efecto en el comportamiento agronómico, la calidad de la fruta y la adaptación a las zonas cálidas. Su actividad investigadora se ha dirigido al estudio de factores que afectan a la satisfacción de los consumidores, en particular, la variedad, la fecha de recolección y la tecnología de producción.

Contacto: iiglesias@agromillora.com

IMBERNÓN MULERO, ALBERTO

Alberto Mulero Imbernón es Ingeniero Agrónomo, Máster en Ingeniería Agronómica y doctorando en la UPCT. Su investigación se centra en la gestión sostenible del riego, especialmente en las dificultades de utilizar agua marina desalinizada en el sureste español. Realizó una estancia de investigación en el UK Centre for Ecology & Hydrology en Wallingford y ha participado en dos proyectos de investigación nacionales. Además, cuenta con publicaciones sobre la reducción de boro en agua desalinizada, riego de precisión y el estudio agronómico de cultivos del sureste de España. Actualmente, forma parte del Grupo de Investigación "Diseño y Gestión en Agricultura de Regadío" de la UPCT y colabora con la Cátedra Universidad-Empresa "Trasvase y Sostenibilidad" José Manuel Claver Calderas.

Contacto: alberto.imbernon@edu.upct.es

INTRIGLIOGLO, DIEGO S.

Diego S. Intrigliogl es Doctor Ingeniero Agrónomo por la UPV, realizó su investigación doctoral en el IVIA, evaluando técnicas de riego deficitario controlado en ciruelo japonés y la utilidad de sensores para medir el estado hídrico del suelo y de la planta. Beca post-doctoral MEC-Fulbright en Cornell University (EE. UU.), donde aprendió sobre la respuesta de cultivos leñosos a factores ambientales que limitan la productividad, lo que le permitió diseñar estrategias de riego integradas. Tras su estancia, regresó al IVIA con un contrato Ramón y Cajal, optimizando el riego y manejo de cultivos como la vid y cultivos emergentes como kaki y granado. Desde 2021, es investigador científico del CSIC en el CIDE-CSIC-UV-GVA, enfocándose en prácticas agronómicas para mejorar la eficiencia en el uso del agua y la calidad de la uva y el vino en ambientes cálidos y semiáridos.

Contacto: diego.intrigliolo@csic.es

LÓPEZ GALARZA, SALVADOR

Salvador López-Galarza es Doctor Ingeniero Agrónomo desde 1986. Profesor Titular de Universidad desde 1989. Catedrático de Universidad en el Área de Producción Vegetal desde 2001. Ha impartido su docencia en el ámbito de la Horticultura y los Cultivos Herbáceos. Actualmente es responsable de la asignatura Técnicas avanzadas de la Producción Hortícola. Ha colaborado en diversos cursos de posgrado. Ha sido ponente sobre aspectos diversos de los cultivos hortícolas en conferencias y congresos nacionales e internacionales.

Contacto: slopez@upv.es

LÓPEZ URREA, RAMÓN

Ramón López-Urrea es Doctor Ingeniero Agrónomo por la UCLM, donde realizó su tesis doctoral en el ITAP de Albacete. Actualmente, es Investigador Científico en el Centro de Investigación sobre Desertificación (CIDE), CSIC-UV-GVA. Su investigación incluye la determinación de evapotranspiración de cultivos mediante lisímetros, micro-meteorología, teledetección, estrategias de riego deficitario y modelos de simulación de crecimiento. Es autor de más de 50 artículos en revistas indexadas, 10 capítulos de libros y ha participado en 28 proyectos nacionales e internacionales, siendo IP en 8. Ha realizado estancias en el USDA y en Colorado State University. Colabora con la FAO en la actualización del manual FAO56.

Contacto: lopez-urrea@csic.es

LORENZO MÍNGUEZ, PILAR

Pilar Lorenzo Mínguez es Doctora en Ciencias Biológicas por la Universidad de Barcelona en 1994, es Coordinadora de Investigación en Horticultura en el Centro IFAPA de La Mojonera, Almería. Desde 1986, ha coordinado proyectos del Plan Nacional sobre control climático en invernaderos, respuesta productiva de cultivos y gestión del riego en sustratos. Es autora de múltiples publicaciones científico-técnicas y ha sido profesora en el Programa de Doctorado de la Universidad de Almería y en el máster 'Producción Vegetal en Cultivos Protegidos'. También ha participado en cursos de especialización técnica sobre manejo de clima en invernaderos, producción integrada y fertirrigación.

Contacto: pilar.lorenzo.mlm@gmail.com

LORITE TORRES, IGNACIO

Ignacio Lorite es Investigador principal y coordinador del área de recursos naturales y forestales del IFAPA, cuenta con más de 25 años de experiencia en gestión de recursos hídricos. Su carrera inició en el Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC) y en la Universidad de Idaho (EE.UU.), enfocándose en la adaptación de la agricultura mediterránea al cambio climático. Ha liderado proyectos nacionales e internacionales utilizando tecnologías como teledetección e inteligencia artificial. También ha desarrollado herramientas para la toma de decisiones agrícolas y ha participado en eventos de divulgación en España, Portugal y Sudamérica.

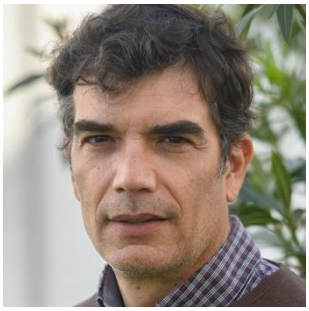
Contacto: ignacioj.lorite@juntadeandalucia.es

MAESTRE VALERO, JOSÉ FRANCISCO

José Francisco Maestre Valero es Doctor Ingeniero Agrónomo y Máster en Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario por la UPCT. Profesor Titular desde 2019, tiene 17 años de experiencia en gestión del agua en la agricultura y recursos hídricos no convencionales. Ha realizado estancias en el UK Centre for Ecology and Hydrology y el CSIC. Participó en varios proyectos de investigación, siendo investigador principal en tres, y ha colaborado en diez contratos de investigación. Su trayectoria incluye 60 artículos en revistas de alto impacto y la dirección de tres tesis doctorales basadas en un compendio de publicaciones.

Contacto: Josef.maestre@upct.es

MANZANO JUÁREZ, JUAN



Juan Manzano Juárez es Doctor Ingeniero Agrónomo y Titular de Universidad en el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, imparte asignaturas de Mecánica de Fluidos, Máquinas Hidráulicas e Ingeniería Hidráulica. Su investigación se centra en la gestión de sistemas de riego para mejorar el uso del agua, energía y fertilizantes. Sus líneas de trabajo incluyen la caracterización y manejo de componentes de riego, el uso de modelos agrohidrológicos y sensores para estimar las necesidades hídricas de cultivos, y herramientas para el ahorro de energía en sistemas de riego a presión.

Contacto: juamanju@agf.upv.es

MÁRTINEZ ALCÁNTARA, BELÉN

Belén Martínez-Alcántara es Doctora Ingeniero Agrónomo, incorporada al IVIA desde 2003, ha centrado la actividad investigadora en el estudio de la eficiencia de la absorción de nitrógeno y otros macro y micronutrientes como base para una agricultura sostenible en frutales mediterráneos. Colaboradora científica adjunta desde junio de 2024 en el equipo de Fertilidad del Suelo y Nutrición Vegetal especialista en el desarrollo de prácticas sostenibles de fertirrigación a través de la técnica de dilución isotópica.

Contacto: martinez_belalc@gva.es

MARTÍNEZ ÁLVAREZ, VICTORIANO

Victoriano Martínez Álvarez es Catedrático en Ingeniería Agroforestal en la UPCT, es Ingeniero Agrónomo y Doctor Ingeniero Agrónomo por la UPM, con un Máster en Hidrología General y Aplicada, y especializaciones en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Su investigación se centra en la gestión de recursos hídricos en la agricultura, enfocándose en los regadíos del sureste español, el uso de agua desalinizada y la estimación de pérdidas por evaporación. Dirige el Grupo de Investigación "Diseño y Gestión en Agricultura de Regadío" y la Cátedra Universidad-Empresa "Trasvase y Sostenibilidad" José Manuel Claver Calderas.

Contacto: victoriano.martinez@upct.es

MARTÍNEZ CUENCA, MARY RUS

Mary Rus Martínez-Cuenca es Doctora Ingeniera Agrónoma por la UPV, se unió al IVIA en 2008, donde realizó su tesis en nutrición mineral en cítricos. Su investigación se centra en la obtención y evaluación de material vegetal, especialmente patrones de cítricos tolerantes a estreses abióticos. Actualmente, es Científico Titular en el grupo de Patrones de cítricos, trabajando en patrones tolerantes a HLB y en la mejora de patrones de kiwi resistentes a estrés abiótico y combinado. Ha dirigido una tesis doctoral y cuenta con 39 publicaciones en revistas científicas, 3 capítulos de libro, 28 comunicaciones en congresos y 17 artículos de divulgación.

Contacto: martinez_mru@gva.es

MEDRANO CORTÉS, EVANGELINA

Evangelina Medrano Cortés es Doctora Ingeniera Agrónoma por la UPM, ha trabajado desde 1991 en el IFAPA. Desde 2009, es IP en Ingeniería y Tecnología Agroalimentaria, centrada en mejorar la gestión del riego y la nutrición en cultivos hortícolas en invernaderos mediterráneos. Su investigación busca optimizar el uso de recursos y promover una bioeconomía circular mediante la reutilización de recursos y la reducción de emisiones de nitratos. Ha publicado 14 trabajos ISI, 10 capítulos de libros, y participado en más de 50 congresos. Actualmente, lidera el Grupo PAIDI AGR 112 "Horticultura: Agronomía y Protección Vegetal".

Contacto: evangelina.medrano@juntadeandalucia.es

MORALES ALFARO, JULIA

Julia Morales-Alfaro es Doctora Ingeniera Agrónoma por la UPV, su tesis abordó el “Efecto del patrón en la calidad de mandarinas ‘clemenules’ y ‘Tango’ y naranjas sanguinas ‘Tarocco Rosso’ y ‘Moro’.” En 2013, realizó su trabajo final de carrera en el CTP del IVIA y, en 2014, una estancia en el Institute of Food Research en Reino Unido. En 2015, regresó al IVIA como becaria del Fondo Social Europeo para desarrollar su tesis. Desde 2019, forma parte del equipo de Fertilidad del Suelo y Producción Vegetal, enfocándose en prácticas sostenibles de fertilización.

Contacto: morales_jul@gva.es

PADILLA, YAIZA GARA

Yaiza G. Padilla es Doctora en Recursos y Tecnologías Agrícolas por la UPV desde 2023. Cursó el Grado en Biotecnología y el Máster en Mejora Genética Vegetal en la UPV, tras lo cual obtuvo una beca FPI para realizar el doctorado en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias, donde se encuentra actualmente con un contrato posdoctoral. Su investigación se enfoca en el estudio de los mecanismos de tolerancia y el desarrollo de portainjertos de pimiento tolerantes a estreses abióticos.

Contacto: padilla_yai@gva.es

PALAU ESTEVAN, C. VIRGINIA

Virginia Palau Estevan es Profesora del Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria (UPV) desde 2007. Imparte materias relacionadas con la ingeniería hidráulica y agronómica dentro de las titulaciones universitarias del Grado de Ingeniería Agroalimentaria y del Medio Rural y del Máster en Ingeniería Agronómica. Sus áreas de investigación y desarrollo son la caracterización de elementos hidráulicos, instrumentación y metrología, diseño de redes de riego a presión, pequeños sistemas hidroeléctricos y gestión del agua de riego por goteo.

Contacto: virpaes@upv.edu.es

PÉREZ PÉREZ, JUAN GABRIEL

Juan Gabriel Pérez Pérez es Doctor Ingeniero Agrónomo por la UMH de Elche e Investigador Principal del CDAS en el IVIA. Su investigación se enfoca en la eficiencia del uso del agua de riego y la gestión de agua de baja calidad en cultivos mediterráneos. Entre 2001 y 2018 trabajó en el IMIDA (Murcia) y realizó una estancia predoctoral en el Citrus Research & Education Center de la Universidad de Florida en 2004. Su trayectoria postdoctoral incluye estancias en el IVIA, el Istituto Sperimentale per l'Agrumicoltura (Italia) y el Lancaster Environmental Centre. Ha participado en proyectos de investigación, publicando más de 45 trabajos en revistas SCI y un índice H de 22.

Contacto: perez_juaperb@gva.es

PÉREZ PIQUERES, ANA

Ana Pérez-Piqueres es Investigadora en el CDAS en el IVIA. Doctora Ingeniera Agrónoma por la UPV, especializada en microbiología del suelo y valorización de residuos orgánicos en agricultura. Principales temas de actividad investigadora: estudio de la capacidad supresiva de los suelos frente a enfermedades fúngicas; evaluación de la actividad enzimática de los suelos; diseño y optimización de procesos de compostaje y vermicompostaje y desarrollo de prácticas culturales para mejorar la calidad del suelo.

Contacto: perez_anapiq@gva.es

PLAZA PORTOLÉS, PILAR

Pilar Plaza es Ingeniero Técnico Agrícola y Doctora en Ciencia y Tecnología de los Alimentos por la UdL. Desde 2003 trabaja en el IRTA, en el STP. Se especializa en la conservación poscosecha, tratamientos para el control de podredumbres y fisiopatías, mantenimiento de calidad, y verificación de programas de limpieza y desinfección. Ha escrito más de 20 artículos en revistas científicas y nacionales, y ha participado en jornadas de transferencia y cursos de divulgación. También ha colaborado en proyectos científicos internacionales y contratos con empresas.

Contacto: Pilar.Plaza@irta.cat

PRIMO CAPELLA, AMPARO

Amparo Primo-Capella es Licenciada en Biología (2009) y Bioquímica (2011) por la Universitat de València. Doctora en Recursos y Tecnologías Agrícolas desde 2023 por la Universitat Politécnica de València. En el año 2014 comenzó a trabajar en el Instituto Valenciano de Investigaciones Agrarias (IVIA) con una beca de formación otorgada por el Fondo Social Europeo en el Laboratorio de Patrones de cítricos. Actualmente sigue contratada en el IVIA desempeñando su labor postdoctoral en mejora de patrones de cítricos.

Contacto: primo_amp@gva.es

QUIÑONES OLIVER, ANA

Ana Quiñones es Doctora Ingeniero Agrónomo y Licenciada en Ciencias Ambientales por la Universidad Politécnica de Valencia. Profesora de Investigación en el Centro para el Desarrollo Sostenible de la Agricultura del IVIA, del cual es Coordinadora, siendo la responsable del equipo de Fertilidad del Suelo y Nutrición Vegetal. El objetivo de su investigación se centra en la optimización de las prácticas de fertirrigación en cítricos y otros frutales en cultivo convencional, así como, en plantas cultivadas bajo diferentes estreses, y en sistemas de agricultura ecológica.

Contacto: quinones_ana@fgva.es

RALLO ROMERO, LUIS

Luis Rallo es Investigador del INIA desde 1964 y Catedrático de Producción Frutal en la Universidad de Córdoba desde 1975, fue nombrado Profesor Emérito en 2010. Especialista en olivicultura, ha trabajado en mejora varietal, recursos genéticos y fisiología reproductiva. Ha dirigido 34 tesis doctorales y publicado más de 200 artículos y 12 libros, incluyendo "El Cultivo del Olivo", una referencia internacional. Promovió el Máster Internacional de Olivicultura y el primer programa de mejora genética de olivo en España. Recibió premios como el Fruit Award (1991) y el Premio Andalucía de Investigación (2007). Fue Secretario General de Agricultura (2000-2004).

Contacto: lrallo@uco.es

RAMÍREZ CUESTA, JUAN MIGUEL

La línea de investigación de Juan Miguel Ramírez Cuesta se centra en el estudio y evaluación de sistemas agrícolas y principalmente en la gestión del agua y del suelo mediante tecnologías de teledetección y proximidad. Es coautor de 59 contribuciones científicas que han recopilado 585 citaciones, resultando en un índice H de 16. Es Investigador Principal de 3 proyectos nacionales/regionales y 4 contratos con empresas privadas o entidades públicas. Es coautor de 2 Propiedades industriales e intelectuales. Actúa como editor asociado de la revista Irrigation Science. Forma parte del banco de expertos evaluadores de la Agencia Estatal de Investigación.

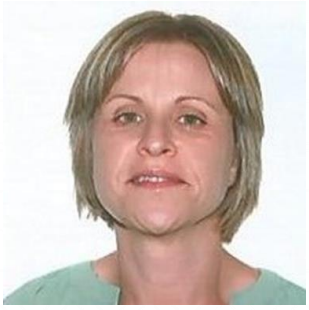
Contacto: juanmiguel.ramirezcuesta@unict.it

ROBLES GARCÍA, JUAN MIGUEL

Juan Miguel Robles García es Doctor Ingeniero Agrónomo por la UPCT. En la actualidad pertenece Cuerpo Superior Facultativo, Escala Científica Superior, opción Investigación Agraria y Alimentaria de la Administración Pública de la Región de Murcia. Está adscrito al Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Medioambiental (IMIDA) en el Equipo de Riego y Fisiología del Estrés dentro del departamento de Bioeconomía, Agua y Medio Ambiente. Su línea principal de trabajo se centra en el diseño de estrategias agronómicas para mejorar la productividad del agua y paliar los efectos del cambio climático bajo condiciones de infradotación hídrica en el cultivo de cítricos.

Contacto: juanm.robles@carm.es

RODRÍGUEZ CARRETERO, ISABEL



Isabel Rodríguez es Licenciada en Química por la UPV y técnico superior de laboratorio de investigación en el CDAS-IVIA. Actualmente realizando doctorado en Aspectos ambientales del aprovechamiento de la paja del arroz mediante compostaje y aplicación en campo (2019-presente, UV). Participación en proyectos de investigación: valorización de residuos mediante compostaje y vermicompostaje, nutrición de parcelas hortícolas y cítricos mediante fertilización orgánica y bioestimulantes microbianos, desarrollo de prácticas de fertilización agrícola sostenible bajo manejo convencional y orgánico, y dinámica de absorción y translocación de macro y micronutrientes en el sistema planta-suelo-agua.

Contacto: rodrigez_isacar@gva.es

ROSA, RAÚL de la

Raúl de la Rosa es Doctor Ingeniero Agrónomo e Investigador Científico en el Instituto de Agricultura Sostenible (CSIC), con amplia experiencia en la caracterización agronómica y molecular de recursos genéticos del olivo. Ha participado en el registro de la primera variedad de olivo mejorada genéticamente en España, 'Sikitita', plantada en más de 3000 hectáreas, y ha registrado otras cinco variedades. Contribuyó a más de 100 publicaciones SCI y 50 de divulgación, participando en 34 proyectos de investigación sobre mejora del olivo, marcadores moleculares, genómica, calidad del aceite y resistencia a estreses. Fundador del Grupo Olivo de la Sociedad Española de Ciencias Hortícolas.

Contacto: raul.rosa@ias.csic.es

RUBIO-CABETAS, MARÍA JOSÉ

María José Rubio-Cabetas es Investigadora del grupo de Mejora Genética en Frutales del CITA-ARAGÓN, donde lidera el programa de mejora de portainjertos y variedades de almendro. Se especializa en biotecnología aplicada a la mejora genética para identificar genes relacionados con vigor, arquitectura, resistencia a enfermedades y adaptación a la sequía. Tiene un Máster en Mejora Genética Vegetal del IAMZ-CIHEAM y un doctorado por la UdL. Ha realizado estancias postdoctorales en el ARS-USDA (EE.UU.), INRA (Francia) y la Universidad Estatal de Washington (EE.UU.). Colabora con programas privados de mejora genética y es Chair del Grupo de Almendro y Pistacho de la ISHS. Ha publicado artículos científicos y coescrito el libro "El cultivo del almendro".

Contacto: mjrubioc@cita-aragon.es

RUIZ BAENA, NATIVIDAD

Natividad Ruiz es Técnico especialista titular del Instituto de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (Junta de Andalucía). Doctora por la Universidad de Córdoba y miembro de @riegosostenible del IFAPA. Experiencia desde 2004 en experimentación, transferencia y formación en riego, enfocada al objetivo fundamental de aumentar la eficiencia en el uso del agua y de los fertilizantes.

Contacto: natividad.ruiz.baena@juntadeandalucia.es

RUIZ SÁNCHEZ, Mª CARMEN

Mª Carmen Ruiz Sánchez es Bióloga por la Universidad de Murcia, e Investigadora Científica del CSIC, en el departamento de Riego del CEBAS, Murcia. Se incorpora a la plantilla del CSIC en 1989, año en el que realiza una estancia en la Universidad de California (USA), y en donde inicia sus investigaciones sobre riego deficitario controlado. Ha sido Vicedirectora del CEBAS y actualmente trabaja en la gestión eficiente del riego, estudiando las relaciones agua-suelo-planta, la respuesta fisiológica y agronómica de las plantas al riego deficitario, y el uso de bio-indicadores de estado hídrico para el riego de precisión en cítricos y frutales.

Contacto: mcruiz@cebas.csic.es

SÁNCHEZ-GUERRERO CANTÓ, Mª CRUZ

Mª Cruz Sánchez-Guerrero Cantó es Doctora en Biología por la Universidad de Murcia en 1999. Investigadora Titular del IFAPA, en el Centro situado en La Mojonera (Almería). Ha participado y coordinado diferentes proyectos de investigación, a nivel regional y del Plan Nacional, en el ámbito de la incorporación de tecnología de control del clima en los invernaderos mediterráneos para mejorar la producción y la eficiencia del uso del agua y los fertilizantes de los cultivos hortícolas. Ha dirigido 3 tesis doctorales y es autora de diversas publicaciones científicas, técnicas y de divulgación. Participa en Cursos de especialización organizados por IFAPA relacionados con el control de clima en invernadero y es profesora externa de la Universidad de Almería en Programas de Doctorado y en el Máster en Producción Vegetal en Cultivos Protegidos.

Contacto: mariac.sanchezguerrero@juntadeandalucia.es

TEIXIDÓ ESPADA, NEUS

Neus Teixidó es Ingeniera Agrónoma por la Universidad de Lleida (1997), con Mención de Doctorado Europeo y Premio Extraordinario de Doctorado 1997/1998. Desde 1998, investigadora del Programa de Poscosecha del IRTA en el Fruitcentre de Lleida, especializada en Patología Poscosecha y control biológico de enfermedades postcosecha. Actualmente, Directora del Programa de Poscosecha y coordinadora del HUB de Sanidad Vegetal. Ha participado en más de 50 proyectos de investigación y contratos, con 4 patentes y más de 160 publicaciones (110 en revistas de impacto internacional, Índice H 33). Ha escrito 10 capítulos de libro y presentado más de 150 comunicaciones en congresos. Ha dirigido 9 tesis doctorales y es docente en el Curso Internacional de Tecnología y Manejo postcosecha de fruta.

Contacto: neus.teixido@irta.cat

Sostenibilidad hídrica en horticultura y poscosecha

ESPECIALISTES EN SERVEIS PER A LA PRODUCCIÓ EDITORIAL, SL
Doctor Manuel Candela 26, 11ª
46021 VALENCIA – ESPAÑA
Tel.: +34-649 48 56 77 / info@poscosecha.com
NIF: B-43458744

www.poscosecha.com
www.postharvest.biz
www.bibliotecahorticultura.com
www.tecnologiahorticola.com
www.actualfruveg.com

www.bibliotecahorticultura.com