

Visión del regadío

Vision of irrigation

Braz-Tangerino, F.^a, Ferreira, M.I.^b, Moreno-Hidalgo, M.A.^{c1}, Playán, E.^d, Pulido-Calvo, I.^e, Rodríguez-Sinobas, L.^f, Tarjuelo, J.M.^{c2} y Serralheiro, R.^g

^aUniversidad Estadual Paulista, UNESP Ilha Solteira, Caixa Postal 34, 15385-000, Ilha Solteira, SP, Brasil. E-mail: fbthtang@agr.feis.unesp.br,

^bInstituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal, e-mail: isabelferreira@isa.utl.pt,

^cCentro Regional de Estudios del Agua, Universidad de Castilla-La Mancha, Campus Universitario, s/n. 02071-Albacete, España. E-mail: ^{c1}miguelangel.moreno@uclm.es. ^{c2}jose.tarjuelo@uclm.es

^dDepartamento Suelo y Agua, Centro experimental Aula, CSIC. P.O. Box. 202, 50080 Zaragoza, España. E-mail: playan@eead.csic.es

^eDepartamento de Ciencias Agroforestales, ETSI, Campus La Rábida, Universidad de Huelva, España. E-mail: ipulido@dcaf.uhu.es,

^fGrupo de Investigación Hidráulica del Riego, Escuela Técnica Superior de Ing. Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid, Ciudad Universitaria 28040 Madrid, España. E-mail: leonor.rodrique@upm.es,

^gInstituto de Ciências Agrárias e Ambientais, Universidade de Évora, 7002-534 Évora, Portugal. E-mail: ricardo@uevora.pt.

Recibido: 13/06/2014

Aceptado: 29/07/2014

Publicado: 01/08/2014

RESUMEN

El regadío ha sido, sigue siendo y será uno de los pilares básicos para el desarrollo y mantenimiento de la población humana. Su evolución pasada ha ido al unísono del avance de los conocimientos en materias propias de agronomía e ingeniería del agua y de la tecnología (desarrollo de materiales plásticos, elementos electrónicos...) llegando a un estado actual en el que todavía están por resolver muchos interrogantes que quedan como retos para el futuro. Cabe destacar el fuerte impulso del regadío en Brasil en la última década. Aprovechando el relanzamiento de la revista Ingeniería del Agua se presenta una visión del regadío, dentro del espacio limitado de este artículo, que incluye algunas de las líneas de investigación actuales, algunas novedosas como la relacionada con el movimiento del agua en el sistema suelo-planta de las especies mediterráneas y sus consecuencias en el uso del agua, con el fin de motivar la publicación en Ingeniería del Agua de artículos relacionados con la variada temática que integra el estudio del Regadío en las comunidades de lengua española y portuguesa

Palabras clave | Regadío; Visión; Retos.

ABSTRACT

Irrigation not only has been a key factor for the development and maintenance of human societies but it still plays this role now and it is foreseen that in the future as well. Its evolution has been constrained to the advance in knowledge on matters regarding Agronomy and Water Engineering and in technology however, many challenges deserve further research. It is worth to note that Brazil has strongly promoted irrigation in the last decade. Within the limited extension of this article, some current topics in irrigation, some of them are innovative such as the research line studying water flow in soil-plant in Mediterranean plants and its consequences on water use, and future challenges are presented with the purpose of stimulate publication of Irrigation papers in the journal "Ingeniería del Agua" among Portuguese and Spanish language communities.

Key words | Irrigation; vision; challenges.

INTRODUCCIÓN

Una visión del regadío completa, con todos los posibles aspectos a considerar, ocuparía una extensión mayor a la asignada a este artículo y tampoco es el objetivo que se persigue; no obstante, siendo conscientes de ello, se ha intentado dar unas pinceladas sobre algunos aspectos significativos que condicionan el regadío actual agrupados en cuatro grandes apartados. Las referencias bibliográficas se han seleccionado y reducido al mínimo para no abrumar y mantener una extensión razonable. Así mismo, la revista pretende poner un espacio abierto a disposición de las comunidades de América del sur para difundir sus experiencias e innovaciones en materia de riego haciendo uso de las dos lenguas: español y portugués. En este sentido, en cada una de las secciones se ha decidido mantener el texto del idioma del autor y aunque pueda parecer arriesgado, pensamos aporta pluralidad y diversidad al conjunto al tiempo que podría resultar más atractivo a los lectores. Los diferentes apartados se dividen en subapartados que pueden parecer inconexos pero que sin embargo, intentan mostrar la heterogeneidad y multidisciplinariedad de la complejidad del regadío.

El apartado “Rasgos del regadío actual” consta de tres subapartados. El primero muestra la evolución del regadío en Brasil dando información de superficie regada, métodos de riego y cultivos. El segundo, comenta la situación de los recursos hídricos para el regadío en Portugal y ofrece algunas reflexiones sobre la sostenibilidad del recurso hídrico en zonas regadas. Finalmente, el tercero muestra, brevemente, los avances más significativos en los tres métodos de riego (superficie, aspersión y goteo) como consecuencia del desarrollo tecnológico y resalta las líneas futuras de desarrollo que solventen algunos de los problemas actuales.

El apartado “Algunos aspectos del diseño y la gestión de sistemas de riego y zonas regables” es el más amplio de todos y el más heterogéneo compuesto por cinco subapartados. En el primero, se exponen algunas pautas para el proyecto y la gestión de sistemas de impulsión, y se detallan las fases para dar solución a los problemas observados en el desarrollo de sistemas de soporte a la decisión. El segundo, trata del ahorro de agua y eficiencia energética en la modernización de regadíos donde se comentan los diferentes pasos para llevarla a cabo y los agentes implicados además, se ofrecen resultados observados en comunidades de regantes modernizadas en España. Completa esta información, el subapartado dedicado a los servicios de asesoramiento al regante en donde se expone sus objetivos y la experiencia española. El cuarto apartado, aborda el tema de la sostenibilidad de los ecosistemas naturales en zonas regadas a partir del estudio de la redistribución hidráulica en especies mediterráneas y sus consecuencias en el uso del agua. El mantenimiento del medio natural y la prevención de la desertificación son prioridades para la toma de decisiones en la planificación y gestión de los recursos hídricos para riego dentro de las directrices marcadas por la Comunidad Económica Europea. Finalmente, el último subapartado reseña las metodologías actuales para estimar el contenido de agua en el suelo que es una variable importante en la programación de los riegos y en la gestión de recursos hídricos. Además, resalta algunos de los retos en esta materia y comenta, brevemente, el potencial del cable de fibra óptica y de la técnica “*Distribute Temperature Sensing*” para estimar el contenido de agua en el suelo de forma continua y precisa a lo largo del cable que puede tener gran longitud.

El último apartado “Retos futuros para el riego” reseña algunos retos sociales, tecnológicos y políticos que condicionarán su desarrollo en un futuro próximo.

Los temas objeto de los subapartados son pinceladas que ayudan a entrever la línea editorial en materia de regadíos. Estas pinceladas se dan en dos aspectos: la situación de los regadíos y el diseño y la gestión de sistemas de riego y zonas regables que quedan abiertas a las comunidades de América del sur para que las traten más específicamente en los próximos números regulares de la revista. Os esperamos, confiamos que con vuestra contribución poco a poco, llegaremos a completar los rasgos presentados en esta visión del regadío.

RASGOS DEL REGADÍO ACTUAL

El regadío en Brasil

O Brasil acordou para os efeitos multiplicadores da agricultura irrigada e tem expandido a presença dos equipamentos de irrigação no campo, gerando e distribuindo oportunidades e riqueza, parte delas possibilitado pelo investimento crescente em sistemas de irrigação.

De acordo com a Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação - CSEI - ABIMAQ em 2012 o Brasil incorporou mais $2.12 \cdot 10^5$ hectares irrigados, em uma taxa 21% maior que em 2011. Já em 2013 incorporamos $2.84 \cdot 10^5$ novos ha, 34% mais do que em 2012 e chegamos ao final do ano com $5.01 \cdot 10^6$ ha irrigados, muito pouco ainda para a área potencial de irrigação de 30 milhões de ha (Figura 1).

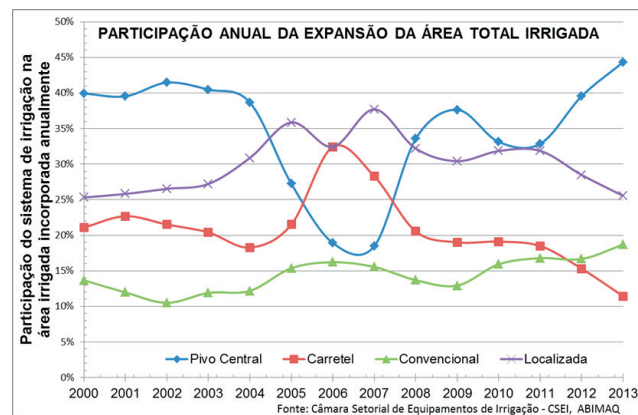


Figura 1 | Participação anual da expansão da área total irrigada.

Nestes dois últimos anos se consolidou a presença dos sistemas de irrigação tipo pivô central que representaram respectivamente 40 e 44% das novas áreas irrigadas, reduzindo a participação relativa da irrigação localizada que até 2011 registrou crescimento. Em relação aos sistemas de irrigação tipo pivô central registrou-se uma diminuição da área média que era de 70 ha por equipamento até 2008, 90 ha em 2009, 80 ha em 2010, 75 ha em 2011, 70 ha em 2012 e 60 ha em 2013 (Tabela 1).

Tabela 1 | Evolução anual da área irrigada no Brasil (Fonte: CSEI - ABIMAQ (2014)).

| | ÁREA TOTAL IRRIGADA / ANO - ha | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
| Pivô Central | 47320 | 50540 | 57820 | 59500 | 47600 | 26600 | 17500 | 19800 | 49000 | 49500 | 52000 | 57750 | 84000 | 126000 |
| Carretel | 25000 | 29000 | 30000 | 30000 | 22500 | 21000 | 30000 | 30000 | 30000 | 25000 | 30000 | 32500 | 32500 | 32500 |
| Convencional | 16200 | 15300 | 14650 | 17500 | 15000 | 15000 | 15000 | 16500 | 20000 | 17000 | 25000 | 29500 | 35400 | 53100 |
| Localizada | 30000 | 33000 | 37000 | 40000 | 38000 | 35000 | 30000 | 40000 | 47000 | 40000 | 50000 | 56000 | 60480 | 72576 |
| Total - ha/ano | 118520 | 127840 | 139470 | 147000 | 123100 | 97600 | 92500 | 106100 | 146000 | 131500 | 157000 | 175750 | 212380 | 284176 |
| Área totalizada | 3.068.480 | 3.196.320 | 3.335.790 | 3.482.790 | 3.605.890 | 3.703.490 | 3.795.990 | 3.902.090 | 4.048.090 | 4.179.590 | 4.336.590 | 4.512.340 | 4.724.720 | 5.008.896 |

O desempenho da irrigação localizada é fortemente dependente das culturas de citros e café que tiveram uma retração devido aos baixos preços destes produtos no mercado e outras frutas não tem uma área de cultivo tão expressiva e assim, o crescimento se deveu essencialmente devido à produção de hortaliças e fruticultura de menor expressão econômica global.

Já os grãos (milho, feijão e soja) tiveram um ano de preços altos e ainda a pastagem se consolidou como uma cultura que alcança grandes resultados quando sob irrigação, e assim, a aspersão, incluindo o pivô central é uma das melhores opções para sua irrigação, especialmente a de grandes áreas, fazendo com que a irrigação por aspersão convencional também aumentasse a sua participação no mercado. Por outro lado, os sistemas tipo carretel enrolador reduziram sua participação no incremento de novas áreas irrigadas fortemente influenciado pela crise enfrentada pelo setor de cana-de-açúcar.

Mas, ainda que haja uma preferência por um sistema ou outro de irrigação para uma determinada cultura, a melhor opção deve ser decidida em função de uma análise conjunta de fatores ligados à cultura, ao solo, a qualidade da água, a topografia e ainda econômico para que se possa tirar o melhor retorno do investimento no sistema de irrigação e assim a capacitação, o treinamento e a disseminação continuada de informações sobre irrigação e a agricultura irrigada deve ser constante. A formação de recursos

humanos qualificados é a melhor maneira de se criar condições para o uso racional de nossos recursos hídricos e ainda expandir as áreas irrigadas de forma sustentável.

Recursos hídricos para el regadío

Pensar o regadío é pensar a sua sustentabilidade – na vertente ambiental e na socioeconómica – onde residem os problemas fundamentais que enfrenta hoje em dia esta forma de agricultura intensiva. A vertente ambiental da sustentabilidade do regadío passa pela conservação dos recursos naturais que lhe são essenciais – o solo, a água e a energia – e também da biodiversidade. O recurso hídrico é, naturalmente, o mais crítico dos fatores de produção em regadío, mas não pode olvidar-se que os três recursos são inseparáveis no que respeita a conservação, quer na disponibilidade quantitativa, quer na qualidade, a qual pode, por seu lado, limitar a disponibilidade quantitativa.

A agricultura é o maior consumidor do recurso hídrico (crescentemente escasso); em Portugal, cerca de 85% dos consumos de água verificam-se na agricultura, com destaque natural para a de regadío (INE, 2011). Neste país, existem cerca de $8 \cdot 10^5$ ha de regadío, sendo a maioria em sistemas antigos de gravidade, com baixa eficiência de transporte e distribuição, embora já haja também, servindo boa parte da área de rega, com destaque para os novos regádios do sul de Portugal (EDIA, s/d), modernos sistemas de transporte e distribuição sob pressão, com a vantagem da maior eficiência, mas também a desvantagem do maior consumo de energia. Este é certamente um dos maiores problemas que o regadío enfrenta e que vai intensificar-se no próximo futuro: a necessidade de otimizar o uso dos fatores de produção água e energia, o que envolverá horizontalmente quase toda a prática do regadío.

As alterações climáticas, que reconhecidamente estão a acontecer em especial na zona mediterrânea (Santos e Miranda, 2006), inevitavelmente vão influenciar as necessidades de rega, começando pelo aumento das temperaturas e da evapotranspiração, mas influenciando talvez até as fases e a duração dos ciclos culturais das plantas e sem dúvida as características regionais da precipitação, diminuindo-lhe as quantidades e aumentando-lhe a irregularidade, aumentando a frequência e a severidades das secas e com isso as necessidades de armazenamento e de recurso ao regadío.

A gestão racional dos recursos hídricos implica desenvolver as ações que promovam efetivamente uma agricultura de conservação em regadío, o combate à erosão do solo, com a melhoria das práticas conservativas, a adequação das culturas, o aumento da matéria orgânica e da estruturação do solo, com a consequente fixação de carbono e o aumento da porosidade, da infiltrabilidade e da capacidade de retenção da água (Serralheiro, 2002).

É fundamental melhorar os sistemas de rega, no sentido da otimização da eficiência de aplicação, aspeto em que há ainda muito caminho para percorrer, mas é necessário simultaneamente definir com rigor as necessidades hídricas das culturas e levar ao conhecimento dos agricultores regantes as inovações tecnológicas que vão contribuindo para a solução destes problemas. Não se pode admitir que seja apenas o agricultor a decidir sobre a economia da água e da energia, forçado pelos preços destes recursos. A economia da água e da energia passará cada vez mais pelas técnicas de gestão das necessidades de rega, com informação eficaz do regante, provavelmente em sistema de avisos de rega aos agricultores. Estes objetivos de gestão da rega implicam, sobretudo nas grandes áreas de regadío, técnicas eficazes de determinação das necessidades hídricas das culturas, incluindo diversos meios de deteção remota e de localização e mapeamento em sistemas de informação geográfica, suportando os referidos avisos de rega aos agricultores regantes.

Associa-se aqui, inevitavelmente, a qualidade do solo e da água no que respeita à salinidade e em especial à presença de sódio, que afeta de forma preocupante muitos dos solos e dos aquíferos em muitos regádios do Mundo, comprometendo-lhes a sustentabilidade (Serralheiro, 2002). São abundantes os exemplos, quer históricos quer atuais, de regádios inviáveis devido à presença excessiva de sais no solo e na água. Em Portugal, o problema coloca-se de forma sensível em vários sistemas de rega, nomeadamente nos novos regádios da bacia do Guadiana, associados ao sistema de Alqueva (EDIA, s/d), podendo no futuro vir a assumir dimensões preocupantes, se não se conseguirem soluções adequadas para os problemas que decorrem da concentração nas águas do rio Guadiana dos sais efluentes dos regádios, onde se destacam cerca de $3 \cdot 10^5$ ha de regadío na parte espanhola da bacia, assim como de mais de 1.5 milhões de habitantes na mesma zona. Este problema da salinidade do solo e da água está muitas vezes associado a falta de drenagem ou dimensionamento insuficiente das respetivas redes.

A sustentabilidade ambiental do uso dos recursos hídricos em regadio passa ainda pela conservação da biodiversidade, que é coisa desprezada na agricultura intensiva. Há que, com criatividade científica, procurar soluções inovadoras também no que respeita à conservação da biodiversidade no planeamento e gestão dos recursos hídricos, ou o regadio não terá futuro na agricultura europeia.

Poderá também fazer parte da adaptação do regadio à economia de água e de energia a consideração dos cenários culturais adequados às condições – climáticas, tecnológicas, de mercado, sociológicas, etc. – que se possam prever ou simular para o futuro. A cenarização cultural pode, por exemplo, comparar a adequação aos futuros regadios de sistemas culturais baseados em culturas de grande rendimento tradicionalmente regadas como o milho e as hortícolas, com outros baseados em pomares, olival, vinha e outras culturas permanentes, e ainda com sistemas tradicionalmente de sequeiro (cereais, leguminosas, pastagens) e cuja produtividade poderá otimizar-se quando beneficiados com rega de complemento. Tal cenarização é importante para apoio à decisão em projetos de novos regadios, como está a acontecer na bacia do Guadiana em Portugal, mas também para adequação dos regadios às alterações climáticas (Valverde *et al.*, 2014).

La tecnología en los métodos de riego

En los inicios del siglo XXI el riego por gravedad coexiste con las dos tecnologías aportadas por el siglo XX: la aspersión y el goteo. La prevalencia de cada uno de los sistemas de riego en Latinoamérica, Portugal y España depende principalmente de tres factores: el entorno socioeconómico, la orientación productiva y las políticas públicas de modernización de regadíos. En Pereira (1999) se muestra la relación entre el rendimiento del riego y la mejora de los métodos de riego.

El último gran avance del riego por gravedad data de los años setenta: la nivelación guiada por láser. A pesar de que esta técnica puede aumentar de forma inmediata la eficiencia de riego, su introducción está siendo lenta sobre todo en Latinoamérica. Considerando la base tecnológica de la nivelación láser, otras técnicas recientes como el riego por pulsos, las redes de distribución para surcos en muy baja presión o la supervisión y el control automáticos también se han desarrollado en algunas zonas. A pesar de estas medidas tecnológicas, el riego por gravedad se halla en retroceso no obstante, debido a que este método de riego no precisa de energía añadida a la aplicación del agua desde parcela hace que recupere relevancia en este siglo que acaba de empezar (Bautista *et al.*, 2009; Koecha *et al.*, 2014).

El riego por aspersión ha culminado en menos de un siglo un fuerte desarrollo tecnológico en cuando a aplicación de agua, adaptación a cultivos y automatización (Bjornlunda *et al.*, 2009; Zapata *et al.*, 2009). En la actualidad se dispone de aspersores de impacto y para máquinas de riego con una gran variedad de gamas y de diseños. En las décadas precedentes se ha caracterizado la dependencia de la uniformidad del riego por aspersión de las variables meteorológicas (viento, temperatura, radiación solar). Los agricultores están implantando técnicas avanzadas de manejo de este sistema de riego, basadas en el riego nocturno y en evitar periodos de viento fuerte. No obstante, para mejorar su eficiencia hacia un nivel óptimo, será preciso avanzar en sistemas automáticos de programación del riego, preferiblemente en agrupaciones de regantes. La gama tecnológica de productos para riego por aspersión es amplia, abarca desde los invernaderos hasta los cultivos extensivos y las grandes máquinas de riego. Muchos de estos productos necesitan mejorar en el ahorro de energía dado que en la actualidad hay una fuerte demanda de sistemas de aspersión a baja presión, que permitan reducir la energía de bombeo o bien aprovechar los desniveles naturales.

El riego por goteo (y microaspersión) ha sido el último en desarrollarse, a partir del desarrollo de los plásticos, alcanzando un gran nivel tecnológico en unas pocas décadas. Los fabricantes de materiales de riego han desarrollado emisores que se adaptan a las necesidades específicas de gran variedad de cultivos y suelos. La característica inherente a este método de riego es que requiere un buen sistema de filtración además de un mantenimiento adecuado más aún, con la utilización creciente de aguas regeneradas. Se han desarrollado tecnologías robustas y automáticas para el riego por goteo. Sin embargo, al igual que en aspersión, uno de los retos críticos es la reducción de energía, lo que afecta en gran medida al proceso de filtrado. Por otro lado, se llevan a cabo dos líneas de trabajo interesantes: el riego por goteo con emisores de bajo caudal y el riego por goteo subsuperficial (emisor enterrado). Mientras que la primera puede contribuir al confort del cultivo y a optimizar el diseño y el coste de los sistemas de riego, la segunda resulta beneficiosa desde el punto de vista agronómico del cultivo. La adaptación del riego por goteo enterrado al desarrollo del cultivo,

especialmente en la fase de nascencia, supone un importante desafío tecnológico. Asimismo, todavía se deben buscar soluciones, respetuosas con el medio natural, a la obstrucción del orificio de desagüe del emisor por la intrusión de las raíces.

ALGUNOS ASPECTOS DEL DISEÑO Y LA GESTIÓN DE SISTEMAS DE RIEGO Y ZONAS REGABLES

Diseño y gestión de sistemas de impulsión

Para la optimización del diseño y operación de los sistemas de impulsión en redes hidráulicas a presión se suele recurrir a modelos de simulación dinámica para optimizar el régimen de bombeo a lo largo de un periodo de tiempo (potencia y características de las bombas, caudal impulsado en cada hora, número de bombas en marcha, horas de funcionamiento y, momentos de arranque y parada).

Una posible regulación de los sistemas hidráulicos es mediante la incorporación de depósitos en la cabecera de la red de distribución (Pulido-Calvo *et al.*, 2006). Un depósito entre la captación, tratamiento, aducción, y la red de distribución de agua actúa como elemento regulador entre los recursos disponibles y la demanda de agua variable a lo largo del tiempo. La finalidad primordial es la optimización del caudal de trabajo de los diferentes elementos (estaciones de bombeo) aguas arriba del depósito, al independizar dichos caudales de la variabilidad del consumo en la red de distribución. De este modo, el dimensionado de estos elementos puede realizarse independientemente de las variaciones que vayan a producirse en el consumo, siendo el depósito el encargado de asumir las discrepancias entre el caudal impulsado a la red y el caudal consumido.

Asimismo la alta inversión que supone la construcción de un depósito de regulación puede verse compensada por la disminución de los costes energéticos mediante: a) un funcionamiento más regular de las estaciones de bombeo con mejores rendimientos en comparación con la impulsión directa a la red de distribución; b) realizar el bombeo a las horas bonificadas de tarifa eléctrica. Durante dicho tiempo se acumulará agua en el depósito, que será consumida en las horas durante las cuales el precio de la energía eléctrica es mayor.

Numerosos estudios específicos (Planells *et al.*, 2005; Moreno *et al.*, 2009; Reca *et al.*, 2014) destacan el desarrollo de sistemas expertos o sistemas de soporte a la decisión que determinan el régimen óptimo de bombeo que origina el menor coste total teniendo en cuenta entre otros parámetros la capacidad hidráulica de la estación de bombeo, el volumen de regulación del depósito, el coste de elevación del metro cúbico de agua y el contrato del suministro de energía eléctrica, todo ello compatibilizado con la capacidad de satisfacer una demanda dada. Incluso hay modelos que incluyen que las bombas pueden regularse mediante las operaciones de arranque y paro y algunas pueden ofrecer además la posibilidad de una variación limitada en su velocidad de giro (accionamientos de variación de velocidad de las bombas).

Para la resolución del problema planteado se suelen proponer modelos jerárquico-multinivel, que descomponen el sistema hidráulico en una serie de subsistemas (Figura 2) que son optimizados de forma independiente. El primer subsistema suele ser la caracterización de la modulación de la demanda de agua de la red de distribución a medio plazo (período anual de funcionamiento), como paso previo a la optimización del régimen de operación del sistema de impulsión, que se inicia con la preselección de los grupos motor-bomba que pueden satisfacer las necesidades máximas de caudal y altura de energía de la red de distribución (segundo subsistema). Se continúa con la determinación de la capacidad de almacenamiento, las combinaciones de bombas y el contrato del suministro de energía eléctrica, que permitan establecer una estrategia de bombeo acorde con la discriminación horaria del coste energético (tercer subsistema). Por último, se analiza el control del sistema en tiempo real a partir de la predicción a corto plazo de la demanda de agua (24 horas) (cuarto subsistema).

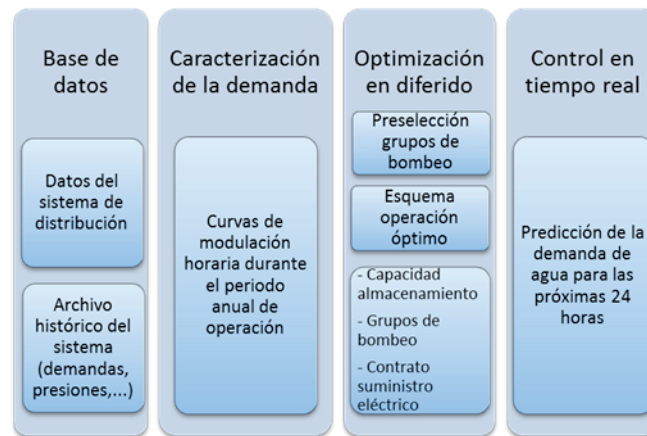


Figura 2 | Módulos de los sistemas soporte de decisión para el diseño y gestión de sistemas de impulsión.

En el control en tiempo real de un sistema de distribución de agua, es fundamental la capacidad de predecir el comportamiento de la demanda de agua. Con esta previsión y unos criterios de gestión determinados, se podrán establecer las estrategias de control del estado de los grupos de bombeo, depósitos y válvulas (modo de trabajo previsto del sistema de distribución). Normalmente, este esquema de operación se planifica para las próximas 24 horas, debido a que las curvas de demanda tienen ciclos diarios y a que los intervalos horarios son la base de los sistemas de discriminación de la tarificación de la energía eléctrica.

La estimación de la demanda diaria en las próximas 24 horas en sistemas de distribución de agua para riego, junto con las técnicas tradicionales de predicción de regresiones lineales y no lineales y la metodología de Box-Jenkins de análisis de series temporales, se han utilizado modelos heurísticos como las Redes Neuronales Artificiales (RNAs) con muy buenos resultados en las técnicas de control inteligente (Pulido-Calvo y Gutiérrez-Estrada, 2009; Martí *et al.*, 2011).

Modernización de regadíos: ahorro de agua y eficiencia energética

La presión existente sobre los recursos hídricos y la necesidad de cubrir las necesidades de alimentación para una creciente población mundial obliga a realizar una gestión de los recursos hídricos integrada que asegure un uso eficiente y sostenible del agua. Ya que el riego consume el 70% del agua dulce en el mundo, llegando a alcanzar el 90% en zonas áridas (Molden, 2007), se vuelve imprescindible incrementar la eficiencia en la práctica del riego, principalmente a través de la mejora y modernización de los sistemas de riego y la implantación de sistemas de gestión del regadío eficientes. La FAO define la modernización de regadíos como un proceso de mejora técnica y de gestión de sistemas de riego combinado con reformas institucionales, en caso de ser necesarias, con el objetivo asegurar el uso eficiente de los recursos y mejorar la disponibilidad de agua para los agricultores. El objetivo de la modernización de las instalaciones de riego no es tan sólo mejorar la gestión del agua en la agricultura sino promover la gestión integrada de recursos hídricos, para lo que se debe tener en cuenta la sostenibilidad social, ambiental y económica de la gestión de los recursos hídricos (Renault *et al.* 2007). Aunque la modernización de regadíos no siempre conlleva el cambio hacia sistemas presurizados, si es cierto que estos sistemas ofrecen una mayor oportunidad para el uso eficiente del agua, además de una mayor posibilidad de automatización de los sistemas que llevan asociados un mayor confort en la práctica del riego. Sin embargo, el gran inconveniente de la modernización hacia sistemas de riego presurizado es el incremento del coste energético, que puede limitar, en ciertos contextos, la viabilidad de algunos cultivos en ciertas zonas.

Los principales agentes implicados en la modernización de regadíos y mejora de procesos son: la administración pública, el regante y asociaciones de agricultores, centros de investigación, técnicos, empresas y consultores, que en conjunto tienen que adoptar la Gestión Orientada a Servicios (Bos *et al.*, 2005, Renault *et al.*, 2007) o los Servicios de Asesoramiento de Riego (IAS) (Ortega *et al.*, 2005) para mejorar su eficiencia en términos económicos y medioambientales, promoviendo la participación de los

usuarios finales del agua en este proceso. Los principales pasos a dar en el proceso de modernización de un área regable vienen resumidos en la Figura 3, junto con los principales agentes implicados.

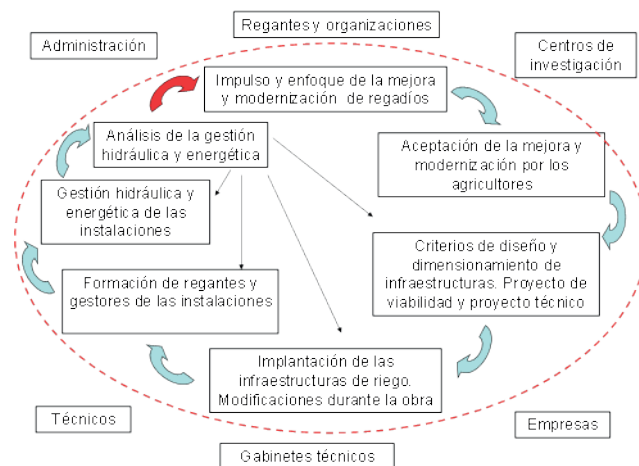


Figura 3 | Principales pasos a acometer en el proceso de modernización de regadíos y agentes implicados.

Jackson *et al.* (2010) cifraron en un ahorro entre el 66 y 10% de agua como resultado de la modernización de sistemas de riego por superficie a sistemas presurizados en Nueva Gales del Sur, donde la fuente de agua era superficial y en el sur de Australia, donde la fuente de agua era subterránea. En contraprestación, el incremento del consumo energético en la primera zona con recursos superficiales fue de un 163%, obteniendo sin embargo ahorros energéticos en la zona dependiente de recursos subterráneos de un 12-44% debido al uso eficiente del agua, y por lo tanto de la energía asociada. En España, donde se ha realizado un gran esfuerzo de modernización de regadíos tradicionales, se han detallado numerosos trabajos que tratan de cuantificar el ahorro de agua obtenido con el proceso de modernización, además de las consecuencias sobre el incremento del consumo energético. Cabe destacar el estudio publicado por Lecina *et al.* (2011), que concluye un incremento del consumo de agua de un 24%, pero acompañado de un incremento de la productividad económica importante (28%). Sin embargo, Jiménez-Aguirre e Isidoro (2012) después de analizar una Comunidad de Regantes localizada en Almodóvar, Huesca, que realizó un proceso de transformación de riego por superficie a riego presurizado por aspersión en 3718 ha de maíz, concluyeron un ahorro de agua de un 32%, incluso a pesar de que las necesidades de riego del cultivo se incrementaron en un 22% debido a las pérdidas de evaporación y arrastre y al incremento de la evapotranspiración del cultivo. Incluso la producción se incrementó en un 40% debido a la mejor programación de riegos y a las menores pérdidas de nitrógeno por percolación.

Sin embargo, en España una de las principales inconvenientes de la modernización de regadío es el incremento del consumo energético, además agravado por el incremento del coste de la energía acontecido principalmente después de acometer la modernización y ante unas condiciones muy distintas a las que condicionaron los diseños de los sistemas de riego. Así, Ederra y Murugarren (2010), analizaron el incremento del coste energético en un área regable de 802 ha comparando datos de 2005 y 2009. En ese periodo, a pesar de no incrementarse el consumo energético, el coste energético sufrió un 82% de incremento. El incremento tan elevado de los costes energéticos no sólo se debió al aumento de las tarifas sino a una inadecuada gestión de los periodos de consumo y de la negociación los contratos con la empresa suministradora, lo que pone de manifiesto la importancia de una adecuada gestión energética de los sistemas de riego modernizados. Rodríguez Díaz *et al.* (2012), analizaron el efecto de la modernización en la comunidad de regantes Bembezar MD de Córdoba, en la que se transformó el riego por superficie en riego presurizado por aspersión y goteo. Estos autores concluyeron un 40% de reducción del uso del agua, pero un mayor uso consuntivo del agua (20%) debido al establecimiento de cítricos, con una mayor demanda de agua.

Los servicios de asesoramiento al regante (SAR)

El principal objetivo de un SAR es ayudar a los agricultores a conseguir un uso eficiente y racional de los medios de producción, y especialmente el agua, los fertilizantes y la energía, así como servir de apoyo científico y técnico para hacer de la agricultura una actividad sostenible, compatible con el medio ambiente. Deberán ser pues el hilo conductor para la transferencia de tecnología, actuando de modo integrado con el agricultor dentro de un proceso de retroalimentación, para que estos puedan ir conociendo y aplicando los avances tecnológicos ligados a la agronomía e ingeniería del riego en su sistema productivo, ayudándoles así a tomar las decisión que le corresponde como empresario responsable de la gestión de su explotación. Esto llevará asociados beneficios de índole económicos (reducción de los costes de producción), sociales y medioambientales (disminución del consumo de agua, energía, fertilizantes, etc., reduciendo el impacto ambiental en las aguas y los suelos), aunque sólo los económicos ya justificarían la viabilidad de este tipo de servicios.

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación de España promueve desde el año 1998 la instalación, explotación y mantenimiento del Sistema de Información Agroclimática para el Regadío (SIAR) (<http://portal.magrama.gob.es/websiar/Inicio.aspx>), que básicamente consiste en la creación de una infraestructura que captura, registra y transmite los datos necesarios para el cálculo de la demanda de agua de los cultivos, cuyo objetivo principal es la optimización del uso del agua de riego. En la actualidad la red SIAR integra casi 500 estaciones agroclimáticas completas distribuidas en 12 Comunidades Autónomas, de las que 9 cuentan con un SAR, y abarcan cerca del 98% de la superficie regada en España.

Transcurridos más de 12 años de la implantación de los SARs asociados a las redes de estaciones agroclimáticas, parece necesario profundizar en el análisis de los resultados obtenidos y tratar de cuantificar los beneficios que estos servicios y estas redes de estaciones han ofrecido y pueden ofrecer a la sociedad. Algunas conclusiones del Servicio Integral de Asesoramiento al regante de Castilla-La Mancha (SIARCLM), con trece años de funcionamiento (<http://crea.uclm.es/siar> o bien <http://www.castillalamancha.es/gobierno/agricultura>), que coinciden en gran medida con el resto de servicios, pueden ser: 1) la página web, concebida como portal de servicios, es un elemento fundamental en los SAR, aunque por sí sola no garantiza el cumplimiento de los objetivos de estos servicios, siendo necesaria una labor previa de difusión directa con los usuarios en las distintas zonas regables como ha sido el caso del SIARCLM durante más de 10 años; 2) la gestión del regadío tiene características propias en cada zona regable, por lo que deben atenderse las demandas de cada una de ellas, diferenciando los servicios prestados; 3) la implicación de las asociaciones de agricultores y la coordinación con las entidades que prestan los servicios es necesaria para la consecución de los objetivos planteados; 4) la formación e información continua de los regantes es imprescindible para poder conseguir los objetivos pretendidos con la creación de la red SIAR y de los SAR; 5) los beneficios económicos, sociales y medio ambientales potenciales de la red SIAR y de los SARs superan normalmente a los costes de los mismos, pero hay que vencer la dificultad de que la información generada sea transmitida, interpretada y aplicada correctamente por los usuarios.

Los costes de un SAR son muy distintos dependiendo de los objetivos perseguidos, así como de la estructura y disposición de las explotaciones. En España se asume de modo general la rentabilidad de los SAR, pero son escasos los trabajos que cuantifican los beneficios. En el SIARCLM se estima que el ahorro de agua puede estar entre un 5 - 20% dependiendo del tipo de explotación, que para una dotación 2500 m³/ha y un precio del agua 0.06 a 0.10 €/ha puede suponer entre 11 y 50 €/ha. El ahorro energético puede estar entre un 5 y 20%, con un ahorro económico entre un 3 y 15%, lo que puede suponer entre 15 y 50 mil € para una Comunidad de Regantes de 1000 ha. Parker *et al.*, (2000) estima que el sistema CIMIS (*California Irrigation Management Information System*) (<http://www.cimis.water.ca.gov/cimis/welcome.jsp>), que asesora 1.47·10⁵ ha, permitió reducir el agua aplicada por los agricultores entre un 10 y un 20%, incrementando un 23% de los productores sus rendimientos, y un 28% de los mismos la calidad de las cosechas. En términos económicos, en el año 2000 cifra los costes del CIMIS en 8.5·10⁵ \$/año, frente a un beneficio estimado por los agricultores 75 veces superior (6.42·10⁷ \$/año).

Redistribuição hidráulica em espécies mediterrânicas e consequências para o uso da água

Nas regiões de clima mediterrânico (6% da superfície terrestre) em resultado dos contrastes sazonais na disponibilidade hídrica das estações húmida/fria e seca/quente, as plantas de raízes profundas têm um protagonismo especial. Cobertos florestais, agro-florestais (e.g sobreiro *Quercus suber*; azinheira *Quercus rotundifolia*), ou culturas agrícolas tradicionalmente não regadas, como a oliveira (*Olea europaea*), videira (*Vitis vinifera*) e outras de menor representação, ocupam vastas áreas do território, em

ecossistemas de elevado valor ambiental, representativos do SO da Europa. Sem rega nos meses mais secos, a carência hídrica das plantas pode ser limitante. Os ecossistemas mediterrânicos com vegetação natural, montados e cobertos lenhosos agrícolas de sequeiro, além do seu valor económico, são importantes para a sustentabilidade ecológica e um ponto alto de biodiversidade a nível europeu e mundial. Para apoiar políticas de ordenamento do território colocam-se questões como: que espécies, cobertos ou sistemas culturais dependem da água subterrânea? O uso da água de aquíferos para rega ameaça os cobertos existentes? A compreensão destes problemas e processos contribui para a capacidade de prevenção de desertificação em áreas vulneráveis.

As plantas perenes de raízes profundas gerem a alternância na disponibilidade versus necessidade de água, acedendo a camadas profundas onde frequentemente encontram disponibilidade de água, mesmo na época estival. Porém, não dispondo aí dos nutrientes necessários, mantêm em funcionamento as raízes superficiais que estão num solo seco, com nutrientes. O sistema radicular mais superficial absorve os nutrientes desde que exista água como veículo. Tal só é possível graças a um mecanismo designado por redistribuição hidráulica.

Vários investigadores estudaram este mecanismo incluindo resultados com marcadores químicos que parecem tornar inquestionável o movimento na direção solo-planta. Para compreender o papel da hidráulica do sistema solo-raiz nos mecanismos de sobrevivência destas espécies, podem instalar-se sensores de fluxo de seiva em raízes, desde que sejam capazes de medir fluxos nas duas direções. Aos primeiros estudos em *Quercus suber*, iniciados em 2002 (Nadezhdina *et al.*, 2008, 2010) no âmbito de um projeto da responsabilidade do Instituto Superior de Agronomia (ISA), num montado em Rio Frio, seguiram-se experiências noutros cobertos representativos de ecossistemas da Península Ibérica, como *Olea europaea* (Ferreira *et al.*, 2012, 2013) e *Vitis vinifera* (não publicados). Decorreram ensaios em dois sistemas agrícolas, olival e vinha de sequeiro, com registos contínuos usando dois métodos independentes de medição de fluxo de seiva em raízes e em troncos de oliveira, lisímetros e o método micrometeorológico das flutuações instantâneas (EC) para quantificar respetivamente a transpiração, a evaporação do solo e a evapotranspiração real, obtendo-se coeficientes culturais, limiares para os indicadores de stress hídrico e funções para o coeficiente de stress, já que também foram quantificados o estado hídrico da planta e solo. Os mecanismos de sobrevivência foram pesquisados nas raízes e na parte aérea numa análise integrada, pioneira para as culturas e condições selecionadas.

No fim da época estival observou-se um crescente transporte de água (redistribuição hidráulica, RH) do solo profundo ou do subsolo, para as raízes que se desenvolvem apenas nas camadas superficiais do solo, quer em *Quercus suber* (2002-2003) quer em *Olea europaea* (Figura 4): 1) de dia, a água sobe sempre das raízes profundas para a parte aérea e a importância relativa do fluxo de camadas mais profundas vai aumentando com o nível de secura edáfica; 2) durante toda a noite, e no início e final do dia, parte da água recebida pelas raízes profundas dirige-se para as raízes superficiais e destas para o solo cujo potencial de água é muito baixo, na direção contrária ao “normal”; 3) a meio do dia, quando o potencial mais baixo está na atmosfera, as pequenas quantidades de água que as raízes superficiais e o solo receberam de noite mobilizam-se na direção das copas, possibilitando a mobilização de nutrientes das raízes superficiais para a parte aérea, no sentido habitual (Ferreira *et al.*, 2012). As observações com outro método (deformação do campo das temperaturas, heat field deformation method HFDm), não só confirmam estas observações em olival mas estendem-nas a três anos, com comportamentos que se intensificam em ano de seca (2012), como descrito em Ferreira *et al.* (2013). Uma redistribuição horizontal discreta entre a linha de árvores e a entre-linha foi observada também em olival de regadio (Nadezhdina *et al.*, 2010)

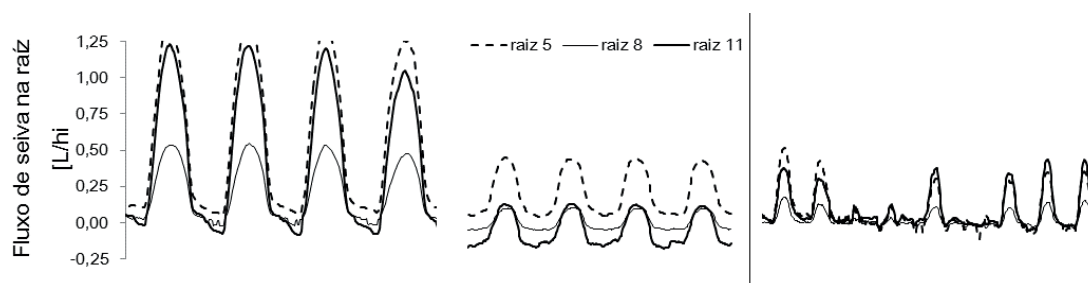


Figura 4 | Fluxo de seiva (método de impulsos de calor CAG modificado para medir fluxos reversíveis) em raízes de oliveira, respetivamente no final das chuvas de primavera (20 a 24 de Junho), no final do período sem chuvas (10 a 14 de outubro) e logo após as primeiras chuvas de outono cujo início foi em 23 de Outubro (cerca de 100 mm de precipitação até 7 de Novembro). A raiz 11, que se verifica ser superficial (heterogeneidade horizontal da água no solo muito inferior à heterogeneidade vertical), retoma a sua importância relativa após as chuvas (adaptado de Ferreira *et al.*, 2012).

As plantas de raíces profundas, mantendo o sistema radical superficial e profundo em sinergia, tornam-se relativamente independentes das precipitações, podendo esta sinergia estender-se a espécies herbáceas associadas. Compreendida a dinâmica e importância deste processo, afigura-se que os cobertos estudados podem apresentar vulnerabilidade a um decréscimo da disponibilidade ao nível freático, por práticas de rega deficientes que comprometam a qualidade/quantidade da água dos aquíferos ou por outros usos em competição com a agricultura. Já que, compreensivelmente, pomares tradicionais têm sido substituídos por pomares regados de maior produtividade mas eventual maior vulnerabilidade a escassez de água, tais cenários devem ser analisados num quadro de alterações climáticas com perspectivas de limitadas disponibilidades hídricas no futuro.

Estimación del contenido de agua en el suelo

Los métodos para medir θ han evolucionado desde el tensiómetro y bloques de yeso, hasta la técnica de reflectometría (TDR) y los sensores capacitivos (ECOH2). En todos ellos, la medida corresponde al contenido de humedad de un volumen pequeño del suelo que rodea la zona próxima a la ubicación del sensor. No obstante, desde 1980, se han desarrollado métodos como el radar de penetración en el terreno (GPR) que puede estimar el contenido de agua de los primeros centímetros del suelo que los otros métodos indirectos en una extensión mayor entre 1 m² a 10 km². En Ferré y Kluitenberg (2003) y en Evett y Parking (2005) pueden consultarse los diferentes métodos de medida con sus fundamentos, ventajas e inconvenientes.

En las últimas décadas al compás del avance de la electrónica, se han desarrollado nuevos métodos de medida con mayor precisión a los anteriores como: utilización de ondas sonoras (Adamo *et al.*, 2004), multi-electrodo no destructivo para medir la resistividad eléctrica del suelo (Michot *et al.*, 2003), sensor de neutrones y rayos cósmicos para obtener medidas del θ en un volumen de suelo de radio 300 m con una profundidad entre los 10-100 cm Zreda *et al.* (2008).

Aunque en la actualidad el rango de sensores y tecnologías es amplio, ninguna de ellas resulta práctica para medir con precisión θ en el perfil del suelo comprendido entre 0-1 m de profundidad y 0.1 a 1000 m en la escala horizontal. En este sentido, queda abierto el reto para desarrollar nuevos procedimientos/métodos que cubran el vacío actual en estas escalas intermedias y permitan enlazar las medidas de agua proporcionadas con los métodos puntuales y las obtenidas a escalas mayores. En este marco cabe mencionar el potencial del cable de fibra óptica y la técnica “*Distribute Temperature Sensing*”.

El método “*Distributed Fiber Optic Temperature Measurement*”, FO-DTS, consiste en emitir un impulso óptico con láser y medir en el tiempo la señal reflejada, de baja intensidad, en diferentes puntos de la fibra óptica. Del espectro de luz reflejada solamente un rango de frecuencias específico, determinado por análisis de frecuencia, se correlaciona con la temperatura. La FO puede colocarse en grandes distancias (hasta 20 km) y la precisión en la medida puede alcanzar $\pm 0.2^\circ\text{C}$ en una distancia de ± 0.25 m (Selker *et al.*, 2006).

Dependiendo de la conductividad calorífica del medio poroso del suelo y de la velocidad del agua se produce un aumento, en el tiempo, de la diferencia de temperatura (antes y después del calentamiento) de la fibra óptica en respuesta al pulso de calor. Cuando θ aumenta en el medio circundante a la fibra, su conductividad térmica aumenta reduciéndose la diferencia de temperatura. Se puede correlacionar esta diferencia de temperatura con la velocidad del fluido circulante a partir de la ecuación de transporte de calor (Kluitenberg *et al.*, 2007) o mediante relaciones experimentales, en columnas de suelo en laboratorio, con el contenido de humedad (Gil *et al.*, 2012).

Una de las variantes del FO-DTS es el método denominado “*Actively Heated Fiber Optic (AHFO)*” en donde el cable está compuesto por una o más fibras ópticas en contacto con un cable de acero inoxidable al que se aplica una corriente eléctrica. La respuesta del suelo a dicho pulso se utiliza para estimar propiedades del suelo como: conductividad térmica, constante calorífica y contenido de humedad (Sayde *et al.*, 2010; Steele-Dunne *et al.*, 2010; Javier Benítez-Buelga, 2014). Este método estima θ de forma distribuida con una resolución espacial y temporal buena por lo que podría aplicarse para mejorar el uso del agua en zonas regadas (Sayde *et al.*, 2012). A modo de ejemplo, la Figura 5 muestra resultados de su potencial de aplicación en campo.

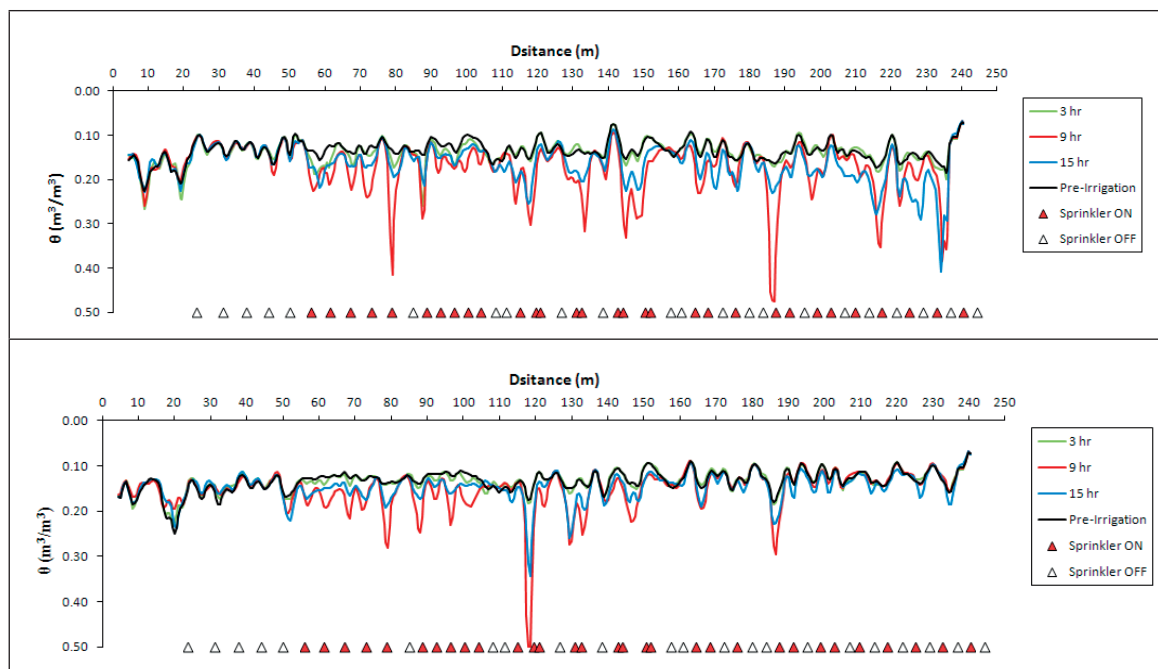


Figura 5 | Estimación de θ con el método AHFO en un campo de riego por pivote, con los aspersores manipulados para echar diferentes volúmenes de agua, a las 3, 9 y 15 h después de un riego de 7 h. El gráfico superior muestra θ a 30 cm de profundidad y el inferior a 60 cm de profundidad (Fuente: Figura 8 Sayde *et al.*, 2014).

RETOS FUTUROS PARA EL RIEGO

El regadío tiene ante sí importantes retos sociales, tecnológicos y políticos de los que se destacan los siguientes:

- La necesidad de proveer los alimentos, fibras y combustibles en las próximas décadas en un contexto de cambio global en el que se prevé que las condiciones climáticas, la demografía, y la demanda cambie rápidamente. Por todo ello, se deberá aumentar la productividad del agua aplicando técnicas del riego deficitario controlado o el riego de precisión, dentro de un marco técnico y socioeconómico adecuado.
- El encarecimiento progresivo de la energía hasta que se elabore e implemente un nuevo sistema energético global. Mientras tanto, se requiere minimizar el consumo energético de los sistemas de riego con especial atención al proyecto del equipo de bombeo y en el desarrollo de estrategias que optimen la asignación del agua a los regantes así como en el estudio de las variables que más afectan al consumo de energía y también, el estudio del uso de energías renovables: viento, sol etc.
- La necesidad de progresar en la automatización del riego, extendiéndola desde la ejecución del riego hasta su programación y supervisión. Un riego completamente automatizado y adaptado a la variabilidad espacial de suelo y cultivo permitirá conseguir dos objetivos complementarios: 1) en zonas agrícolamente desarrolladas, servirá para adaptarse a la despoblación y el envejecimiento demográfico; y 2) en zonas agrícolamente poco desarrolladas permitirá evitar la curva de aprendizaje de las técnicas de programación de riegos. Aún en zonas desarrolladas el factor humano continúa siendo un factor decisivo de la eficiencia de riego.
- Desarrollo de procedimientos que ayuden a la distribución óptima del agua en redes de riego a presión y desarrollo de tecnología práctica y barata para automatizar en el riego por superficie.
- Mejora del proyecto, operación y manejo en el campo de riego para mejorar tanto la eficiencia energética como la aplicación del agua. Así mismo, no se debe olvidar el asesoramiento a los regantes.

REFERENCIAS

- Adamo, F., Andria, G., Attivissimo, F., Giaquinto, N. 2004. An Acoustic Method for Soil Moisture Measurement. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, 53(4), 891-898.
- Bautista, E., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Schlegel, J. 2009. Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96(7), 1146-1154. doi:10.1016/j.agwat.2009.03.007
- Benitez-Buelga, J. 2014. *The implentation of the heated pulsed theory using actively heated fiber optics: measurements of soil volumetric water content and soil volumetric heat capacity*. PhD Dissertation. Tech. University of Madrid, Madrid, Spain.
- Bjornlunda, H., Nicolc, L., Kleind, K.K. 2009. The adoption of improved irrigation technology and management practices—A study of two irrigation districts in Alberta, Canada. *Agricultural Water Management*, 96(1), 121-131. doi:10.1016/j.agwat.2008.07.009
- Bos, M.G., Burton, M.A. Molden, D.J. Eds. 2005. *Irrigation and drainage performance assessment: practical guidelines*. International Institute for Land Reclamation and Improvement Alterra-ILRI, Wageningen, Netherlands.
- Ederra, I., Murugarren, N. 2010. *La nueva tarifa eléctrica. La escalada de precios del agua de riego*. Navarra agrarian.
- EDIA (s/d) – Empresa de Desenvolvimento e Infraestruturas de Alqueva. <http://www.edia.pt>.
- Evelt, S.R., Parking, G.W. 2005. Advances in soil water content sensing. The continuing maturation of technology and theory. *Vadose Zone Journal*, 4(4), 986-991. doi:10.2136/vzj2005.0099
- Ferré, Ty P.A., Kluitenberg, G.J. 2003. Advances in Measurement and Monitoring Methods. *Vadose Zone Journal*. 2(4), 443. doi:10.2136/vzj2003.4430
- Ferreira, M.I., Conceição, N., David, T.S., Nadezhdina, N. 2013. Role of lignotuber versus roots in the water supply of rainfed olives. *Acta Horticulture*, 991, 181-188.
- Ferreira, M.I., Conceição, N., Pacheco, C.A., Green, S. 2012. O que fazem as oliveiras de noite ou redistribuição hidráulica num olival de sequeiro no Alentejo. *Actas do VI Simpósio Nacional de Olivicultura*, 15-17 Novembro, 2012, Mirandela, Portugal, 67-76.
- Gil-Rodríguez, M., Rodríguez-Sinobas, L., Benitez-Buelga, J., Sánchez-Calvo, R. 2013. Application of active heat pulse method with fiber optic temperature sensing for estimation of wetting bulbs and water distribution in drip emitters. *Agricultural Water Management*, 120, 72-78. doi:10.1016/j.agwat.2012.10.012
- Grote, K., Anger, C., Kelly, B., Hubbard, S., Rubin, Y. 2010. Characterization of Soil Water Content Variability and Soil Texture using GPR Groundwave Techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 15(3), 93-110. doi:10.2113/JEEG15.3.93
- INE. 2011. *Recenseamento Agrícola 2009. Dados definitivos. Informação à Comunicação Social*. Lisboa, Instituto Nacional de Estatística, 17 Maio 2011, 13 pp.
- Jackson, T.M., Khan, S., Hafeez, M. 2010. A comparative analysis of water application and energy consumption at the irrigated field level. *Agricultural Water Management*, 97(10), 1477-1485. doi:10.1016/j.agwat.2010.04.013
- Koecha, R.K., Smithb, R.J., Gilliesb, M.H. 2014. Evaluating the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 142, 77-87. doi:10.1016/j.agwat.2014.04.020
- Kluitenberg, G.J., Oschner, T.E., Horton, R. 2007. Improved analysis of heat pulse signals for soil water flux determination. *Soil Science Society of American Journal*, 71(1), 53-55. doi:10.2136/sssaj2006.0073N
- Jiménez-Aguirre, M.T., Isidoro, D. 2012. Efecto de la modernización de la comunidad de regantes de Almodévar (Huesca) sobre el cultivo del maíz. *Tierras de Castilla y Leon: Agricultura*, 193, 102-109
- Martí, P., Manzano, J., Royuela, A. 2012. Assessment of a 4-input artificial neural network for ETo estimation through data set scanning procedures. *Irrigation Science*, 29(3), 181-195. doi:10.1007/s00271-010-0224-6

- Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoulaud, B., King, D., Tabbagh, A., 2003. Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39(5), 1138. doi:10.1029/2002WR001581
- Molden, D. 2007. *Water for food. Water for life. A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. International Water Management Institute (IWMI) and FAO.
- Moreno, M.A., Planells, P., Córcoles, J.I., Tarjuelo, J.M., Carrión, P.A. 2009. Development of a new methodology to obtain the characteristic pump curves that minimize the total cost at pumping stations. *Biosystems Engineering*, 102(1), 95-105. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.09.024
- Nadezhdina, N., David, T.S., David, J.S., Ferreira, M.I., Dohnal, M., Tesar, M., Gartner, K., Leitgeb, E., Nadezhdin, V., Cermak, J., Jiménez, M.S., Morales, D. 2010. Trees never rest: the multiple facets of hydraulic redistribution. *Ecohydrology*, 3(4), 431-444. doi:10.1002/eco.148
- Nadezhdina N, Ferreira MI, Silva R, Pacheco CA 2008. Seasonal variation of water uptake of a Quercus suber tree in Central Portugal. *Plant and Soil* 305 (1-2), 105-119. doi:10.1007/s11104-007-9398-y
- 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(1-3), 37-58. doi:10.1016/j.agwat.2004.09.028
- Parker, D., Cohen-Vogel, D.R., Vanderbilt, D.R., Osgood, D.E., Zilberman, D., 2000. Publicly funded weather database benefits users statewide. *California Agriculture*, 54(3), 21-25. doi:10.3733/ca.v054n03p21
- Pereira, L.S. 1999. Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agricultural Water Management*, 40(2-3), 153-169. doi:10.1016/S0378-3774(98)00118-8
- Planells, P., Carrión, P., Ortega, J., Moreno, M.A., Tarjuelo, J.M. 2005. Pumping selection and regulation for water-distribution networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(3), 273-281. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:3(273)
- Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C. 2009. Improved irrigation water demand forecasting using a soft-computing hybrid model. *Biosystems Engineering*, 102(2), 202-218. doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.09.032
- Pulido-Calvo, I., Gutiérrez-Estrada, J.C., López-Luque, R., Roldán, J. 2006. Regulating reservoirs in pressurized irrigation water supply systems. *Journal of Water Supply Research and Technology-AQUA*, 55(5), 367-381.
- Reca, J., García-Manzano, A., Martínez, J. 2014. Optimal pumping scheduling for complex irrigation water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 140(5), 630-637. doi:10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000360
- Rodríguez-Díaz, J.A., Pérez-Urrestarazu, L., Camacho-Poyato, E., Montesinos, P. 2012. Modernizing water distribution networks: Lessons from the Bembézar MD irrigation district, Spain. *Outlook on Agriculture*, 41(4), 229-236, IP Publishing Ltd. doi:10.5367/oa.2012.0105
- Renault, D., Facon, T., Wahaj, R. 2007. Modernizing Irrigation Management: The MASSCOTE Approach-Mapping System and Services for Canal Operation Techniques. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 63, 177 pgs, Roma, Italy.
- Santos, F.D., Miranda, P. 2006. *Alterações climáticas em Portugal. Cenários, Impactos e Medidas de Adaptação – Projeto SIAM II*. Lisboa, Gradiva.
- Sayde, C., Gregory, C., Gil-Rodríguez, M., Tuffillaro, N., Tyler, S., van de Giesen, N., English, M., Cuenca, R., Selker, J.S. 2010. Feasibility of soil moisture monitoring with heated fiber optics. *Water Resources Research*, 46(6), W06201, doi:10.1029/2009WR007846
- Sayde, C. 2012. *Improving soil water determination in spatially variable field using fiber optic technology and Bayesian decision theory*. PhD Dissertation Oregon State University, Corvallis, USA.

- Sayde, C., Benítez-Buelga, J., Rodríguez-Sinobas, L., El Khoury, L., English, M., van de Giesen, N., Selker, J.S. 2014. Mapping Variability of Soil Water Content and Flux across 1-1,000 m scales using the Actively Heated Fiber Optic Method. Accepted in *Water Resources Research*.
- Selker, J.S., Thévenaz, L., Huwald, H., Mallet, A., Luxemburg, W., van de Giesen, N., Stejskal, M., Zeman, J., Westhoff, M., Parlange, M.B. 2006. Distributed Fiber Optic Temperature Sensing for Hydrologic Systems. *Water Resources Research*, 46(12), W12202. doi:10.1029/2006WR005326
- Serralheiro, R.P. 2002. A sustentabilidade do regadio e a conservação do solo e da água em condições mediterrâneas. In *Água, Recurso a Preservar*, Anais da Universidade de Évora, Dez 2002, 209 – 248.
- Steele-Dunne, S.C., Rutten, M.M., Krzeminska, D.M., Hausner, M., Tyler, S.W., Selker, J., Bogaard, T.A., van de Giesen, N.C. 2010. Feasibility of soil moisture estimation using passive distributed temperature sensing. *Water Resources Research*, 46(3), W03534. doi:10.1029/2009WR008272
- Valverde, P., Serralheiro, R., Carvalho, M., Shahidian, S., Rodrigues, C. 2014. Efeitos das alterações climáticas nas necessidades úteis de rega na bacia do Guadiana, *Revista Recursos Hídricos*, 35(1), 53-67. doi:10.5894/rh35n1-4.
- Zapata, N., Playán, E., Skhiri, A., Burguete, J. 2009. Simulation of a Collective Solid-Set Sprinkler Irrigation Controller for Optimum Water Productivity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(1), 13-24. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2009)135:1(13)
- Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T.P.A., Scott, R.L. 2008. Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*, 35(21), L21402. doi:10.1029/2008GL035655