



IV Jornadas de Ingeniería del Agua
La precipitación y los procesos erosivos
Córdoba, 21 y 22 de Octubre 2015

Efecto de la uniformidad de aplicación del agua de los sistemas de riego y en la producción de los cultivos de la Comunidad de Regantes “Río Adaja”

L. Rodríguez Sinobas, I. Naroua, R. Sánchez Calvo

Grupo de Investigación “Hidráulica del Riego” . Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Téc. Superior de Ing. Agrónomos. Ciudad Universitaria 28040 Madrid

1. Introducción. Objetivos

Los recursos hídricos son, cada vez, más limitados, de calidad inferior, y la competencia entre los diferentes usuarios es mayor. En España, al regadío se destina, aproximadamente, el 75 % del total de los recursos (MAGRAMA, 2012). Por otra parte, a la aplicación del agua de riego van ligados otros recursos como la energía lo que condiciona la rentabilidad del regadío por el incremento del coste de la producción agrícola. En este sentido, conviene desarrollar criterios de manejo del riego adecuados que mejoren la eficiencia en el uso del agua y, por ende, de energía. En muchos casos, la aplicación de riegos deficitarios ha sido una alternativa a considerar dado que mejora el rendimiento de los cultivos, comparados con su cultivo en secano, y mejora la productividad de agua. No obstante, el déficit hídrico no afecta por igual a todos los cultivos por lo que, en cada uno de ellos se deberá asignar las dosis de agua más adecuadas.

La política hidráulica en España en las dos últimas décadas, ha favorecido la modernización y creación de numerosas Comunidades de Regantes CCRR con fines sociales, para asentar la población rural, en la cuenca del Duero. Entre ellas, se encuentra La Comunidad de Regantes “Río Adaja” que comenzó a regar una superficie de 1220 ha en 2010 y, actualmente, riega 6000 ha. Se riega con riego a presión con los métodos de: pivote central, ramal de avance frontal y cobertura total siendo el primero de ellos el predominante. Durante los tres primeros años de funcionamiento, los regantes han cambiado sus cultivos tradicionales de cereal por los cultivos hortícolas, con mayores necesidades hídricas pero de mayor rentabilidad.

Según Corominas (2010) las actuaciones llevadas a cabo por el Plan Nacional de Riegos, han mejorado la eficiencia en el uso del agua del riego y ha disminuido un 20 % el volumen de agua. Entre las acciones llevadas a cabo, se automatizó el control y manejo de la distribución del agua en los sistemas de riego y se hizo hincapié, en la sostenibilidad del medio natural. El Plan ha transformado los riegos por superficie a presión.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es evaluar la uniformidad de aplicación del agua y manejo del riego en la Comunidad de Regantes “Río Adaja” y su efecto en la eficiencia y productividad del agua de los principales cultivos en sus tres primeros años de funcionamiento y en su caso, proponer criterios de manejo del riego que mejoren sus condiciones actuales. Esta CCRR es representativa de las de la cuenca Duero por lo que los resultados podrán hacerse extensivos otras CCRR de la misma cuenca.

2. Materiales y Métodos

2.1 Comunidad de Regantes “Río Adaja”

La sede de la comunidad de regantes CCRR “Río Adaja” se ubica en Nava de Arévalo, al norte de la provincia de Ávila, en la comunidad autónoma de Castilla y León (latitud: 40 °58'47,55" norte y longitud: 4 °46',88" oeste). La zona regable pertenece a la cuenca hidrográfica del Duero con una superficie de 97290 km², de los cuales 5386 km² pertenece a Ávila .

Desde principios del siglo XX, parte de la superficie ocupada por la CCRR regaba con agua subterránea. En el tiempo, las extracciones excedieron a la recarga del acuífero y se redujo drásticamente el nivel freático lo que provocó la aparición de arsénico por la oxidación de la roca madre. En consecuencia, los bombeos cesaron por problemas de contaminación. Para paliar esta situación, en 2006, empezó la transformación y ampliación de la zona regable con un proyecto de modernización del riego a presión.

El agua de la CCRR se capta en el río Adaja y se regula en la presa del Castro de las Cogotas. Los recursos hídricos almacenados en el embalse abastecen una superficie regable de casi 7200 ha dividida en 5 sectores de riego (I, II, III, IV y V). Los sectores I y IV y los sectores II y III riegan, a la demanda, de forma simultánea desde sendas balsas de regulación mientras que el sector V se riega con el agua almacenada en una tercera balsa.

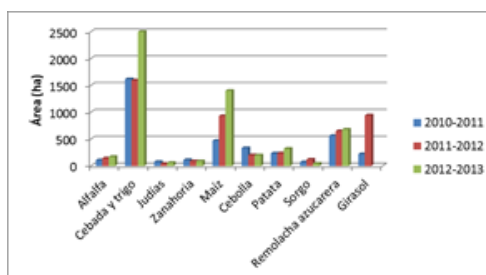


Figura 1. Evolución de la superficie de los cultivos principales en la CCRR “Río Adaja”.

La superficie regada ha aumentado de 1220 a 6000 ha desde 2010 y 2013 (Figura 1). Como consecuencia de la transformación en regadío, han surgido empresas familiares en el sector agrícola lo que ha promovido el desarrollo social de la región y ha incrementado el

beneficio de los regantes. La superficie dedicada inicialmente a cultivos extensivos de secano ha dado paso a cultivos hortícolas con mayor rentabilidad económica.

2.2 Evaluación de la aplicación del agua en los sistemas de riego

En el primer año de funcionamiento de la CCRR se realizó una evaluación de los sistemas de riego bajo las condiciones de operación habituales del regante (Naroua et al., 2012). En total, se evaluaron 13 sistemas dos con cobertura total (CT), un ramal autopropulsado (RAF) y 10 pivotes centrales (PC). Estos sistemas correspondieron a regantes que de forma voluntaria se prestaron al estudio y constituye una muestra representativa del conjunto de la CCRR. Las evaluaciones de campo siguieron los procedimientos de las normas ISO 11545 e ISO7749-2 correspondientes a los sistemas de riego por aspersión.

Se determinó el coeficiente de uniformidad de Christiansen CUC y los resultados del riego mediante los índices: rendimiento de aplicación Ra, coeficiente de déficit Cd y coeficiente de filtración profunda Cp (Losada, 2005).

2.3 Evaluación de la eficiencia en el uso del agua y de su productividad

Los indicadores de eficiencia del uso y de productividad del agua sirven para analizar la disponibilidad y manejo del agua y del riego entre cultivos (Droogers y Kite, 1999; Lorite et al., 2004, Clemmens y Molden, 2007; Playan y Mateos, 2006; Pereira et al. 2012; Moreno-Pérez y Roldán-Cañas, 2013 y Andrés y Cuchí, 2014). A continuación se detallan los considerados en este trabajo.

Eficiencia del uso del agua

Suministro relativo anual de riego (Anual relative irrigation supply, ARIS):

$$ARIS = \frac{\text{Volumen de riego anual}}{\text{Volumen anual de las necesidades del riego del cultivo}} \quad [1]$$

Suministro relativo anual del agua (Annual relative water supply, ARWS).

$$ARWS = \frac{\text{Riego+Precipitación efectiva}}{ET_a} \quad [2]$$

Suministro relativo de precipitación (Relative rainfall supply, RRS):

$$RRS = \frac{\text{Precipitación efectiva}}{ET_a} \quad [3]$$

Productividad del agua

Productividad de agua (Water productivity, WP):

$$WP = \frac{\text{Rendimiento cosechado} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{ha}}\right)}{(\text{Riego+Precipitación efectiva}) \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}}\right)} \quad [4]$$

Productividad del agua del riego (Irrigation water productivity, IWP):

$$IWP = \frac{\text{Rendimiento cosechado } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{ha}}\right)}{\text{Riego } \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}}\right)} \quad [5]$$

Productividad de la evapotranspiración (ETWP):

$$ETWP = \frac{\text{Rendimiento cosechado } \left(\frac{\text{Kg}}{\text{ha}}\right)}{ET_a \left(\frac{\text{m}^3}{\text{ha}}\right)} \quad [6]$$

Los precios de los productos recolectados se tomaron de los publicados en el anuario de estadísticas agropecuarias de Castilla y León, 2012.

2.4 Simulación del efecto del riego y su manejo en la producción y productividad del agua de los cultivos

El rendimiento de los cultivos depende del agua consumida pero no siempre se dispone de ella en la cantidad requerida para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos. Los modelos de producción de cultivos relacionan su rendimiento con el consumo de agua o nivel de satisfacción de sus necesidades hídricas (Doorenbos y Kassam 1979). En ellos, los indicadores de uniformidad de aplicación del agua de riego y de eficiencia de aplicación del agua se utilizan para analizar o elaborar criterios de manejo de riego que mejoren el uso agua. Considerando la función de producción de Doorenbos y Kassam (1979) y el coeficiente de déficit de riego (Losada, 2005) se llega a:

$$C_d = \frac{H_d}{H_r} \text{ y } H_d = H_r - H_n \quad [7]$$

Por lo que:

$$C_d = 1 - \frac{R_a H_b}{H_r} \quad [8]$$

Además si se asume que:

$$\sum H_d = ET_{\max} - ET_a \quad [9]$$

Se obtiene:

$$1 - \frac{ET_a}{ET_{\max}} = C_d \sum \frac{H_r}{ET_{\max}} \quad [10]$$

La expresión [10] muestra que la reducción relativa de la evapotranspiración depende del coeficiente de déficit de riego y de la ET_{\max} cubierta por el suministro del riego $\sum \frac{H_r}{ET_{\max}}$.

Considerando que β es la fracción de ET_{\max} cubierta por fuentes distintas al riego (en este caso se considera la precipitación efectiva) se obtiene (Mantovani et al., 1995; de Juan et al., 1996; Tarjuelo et al., 1996):

$$1 - \frac{Y}{Y_{\max}} = K_y C_d (1 - \beta) \quad [11]$$

Así mismo, considerando que la distribución de lluvia en el riego por aspersión se ajusta a una distribución normal, el coeficiente de uniformidad CUC se determina en función del C_d (Mantovani et al., 1995; de Juan et al., 1996; Tarjuelo et al., 1996; Villalobos et al., 2013). Denominando α a la fracción de superficie mojada que ha recibido una lámina de riego mayor que la lámina requerida se tiene:

$$CUC = \left(1 - \frac{(H_{\max} - H_b)}{2H_b}\right) \text{ y } H_b = \frac{H_{\max} + H_{\min}}{2} \quad [12]$$

Siendo H_{\max} y H_{\min} las láminas máxima y mínima, respectivamente.

$$\alpha = 0,25(1 - CUC)^{-1} \left(3 - 2CUC - \frac{H_r}{H_b}\right) \quad [13]$$

Si se supone C_d constante en todos los riegos, los valores de H_b/H_r son constantes por lo que el efecto del manejo del riego en la producción del cultivo se puede simular para diferentes valores H_b/H_r y CUC. En este trabajo el efecto del riego y su manejo en la producción y productividad del agua se simuló en los cultivos principales de la CCRR. A partir de los datos climáticos de los 12 años disponibles en de la estación climática de la CCRR, se definieron tres años tipo representativos (medio, húmedo y seco) y se simuló el efecto del manejo del riego.

3. Resultados y discusión

3.1 Uniformidad de aplicación y resultados de los sistemas de riego

En la Tabla 1 se muestran los valores de los indicadores de los resultados del riego. La uniformidad de aplicación del agua (CUC) osciló dentro del intervalo entre 70 a 89%. Teniendo en cuenta la clasificación de Keller y Blieser (2000) (valores de $CUC < 75\%$ se consideran relativamente bajos), la distribución del agua de los pivotes centrales: PC 1, PC 2, PC 3, PC 4, PC 5, PC 6, PC 7, PC 9 y PC 10 junto con los de cobertura total CT1 y CT 2 y el ramal de avance frontal RAF, es bueno (90% de los sistemas evaluados). Por el contrario, la uniformidad del 10% de los pivotes centrales debe mejorarse. Así mismo, los resultados de riego han sido variables y se mejorarían si se modifica la frecuencia del riego.

| Sistema | H_b (mm) | H_m (mm) | H_n (mm) | H_r (mm) | CUC (%) | R_a | | | C_d | C_p | C_{ev} |
|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|------------|-----------|-----------|-----------|-------|-------|----------|
| | | | | | | H_n/H_m | H_m/H_b | H_n/H_b | | | |
| PC 1 | 5,17 | 4,12 | 3,27 | 3,41 | 84 | 0,79 | 0,80 | 0,63 | 0,04 | 0,16 | 0,20 |
| PC 2 | 5,24 | 3,94 | 3,79 | 4,18 | 87 | 0,96 | 0,75 | 0,72 | 0,1 | 0,03 | 0,25 |
| PC 3 | 5,25 | 3,76 | 3,22 | 3,34 | 81,9 | 0,86 | 0,71 | 0,61 | 0,04 | 0,10 | 0,29 |
| PC 4 | 6,97 | 5,57 | 4,96 | 5,21 | 86 | 0,89 | 0,80 | 0,71 | 0,05 | 0,09 | 0,20 |

| | | | | | | | | | | | |
|-------|------|------|------|------|----|------|------|------|------|------|------|
| PC 5 | 9,36 | 7,53 | 5,81 | 6,00 | 89 | 0,77 | 0,80 | 0,62 | 0,03 | 0,18 | 0,20 |
| PC 6 | 8,00 | 7,57 | 7,42 | 8,82 | 79 | 0,98 | 0,95 | 0,93 | 0,16 | 0,02 | 0,05 |
| PC 7 | 4,42 | 3,81 | 3,04 | 3,30 | 78 | 0,80 | 0,86 | 0,69 | 0,08 | 0,18 | 0,14 |
| PC 8 | 4,69 | 3,38 | 2,69 | 3,00 | 70 | 0,80 | 0,72 | 0,57 | 0,10 | 0,15 | 0,28 |
| PC 9 | 6,20 | 3,76 | 3,28 | 3,36 | 88 | 0,87 | 0,61 | 0,53 | 0,03 | 0,08 | 0,39 |
| PC 10 | 2,97 | 1,67 | 1,38 | 1,47 | 79 | 0,83 | 0,56 | 0,47 | 0,06 | 0,09 | 0,44 |
| CT 1 | 6,95 | 6,34 | 5,56 | 6,03 | 77 | 0,86 | 0,91 | 0,79 | 0,09 | 0,13 | 0,09 |
| CT 2 | 4,75 | 4,57 | 3,63 | 3,73 | 82 | 0,79 | 0,96 | 0,76 | 0,03 | 0,20 | 0,04 |
| RAF | 6,93 | 5,88 | 4,71 | 4,77 | 89 | 0,80 | 0,85 | 0,68 | 0,01 | 0,17 | 0,15 |

Tabla 1. Resultados de las evaluaciones de campo.

3.2 Uso del agua y de su productividad

En las Figuras 2 y 3 se muestran los valores de los indicadores de uso y productividad del agua de los principales cultivos de la CCRR. En los dos primeros años el riego no cubre las necesidades hídricas de los cultivos (ARIS<1), excepto para la zanahoria el primer año (2010-2011) en donde se aplicó un riego en exceso. Sin embargo, en el último año (2012-2013) la tendencia se invirtió y la mayoría de los cultivos se regaron en exceso.

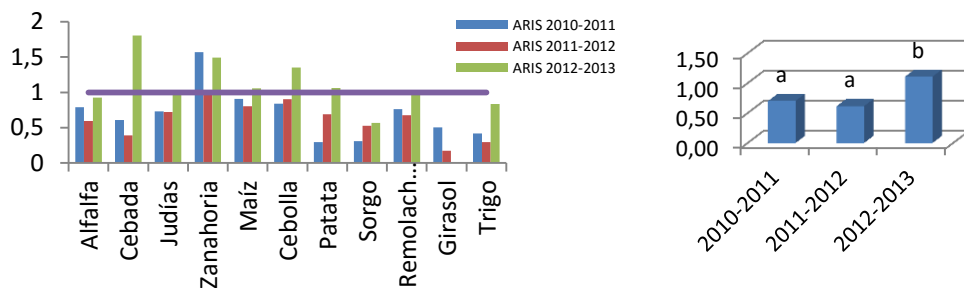


Figura 2. Valores del índice ARIS de los principales cultivos en la CCRR en cada campaña de riego. (Nota: letras diferentes indican que la diferencia entre los valores es significativa)

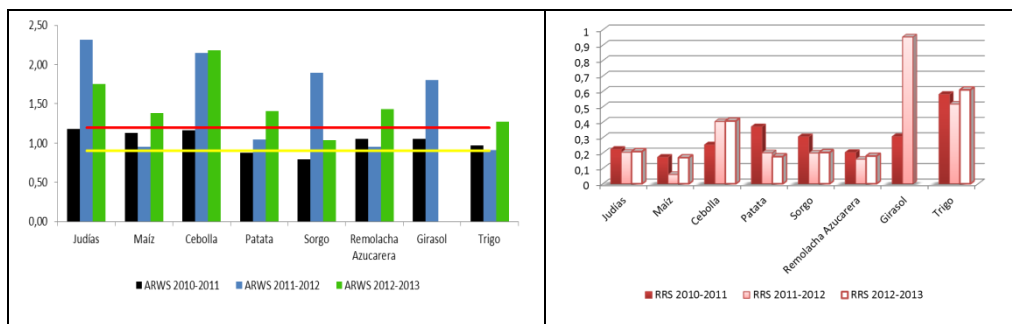


Figura 3. Valores del índice ARWS y RRS de los cultivos de los principales cultivos en la CCRR.

Según el índice ARIS, los cultivos se clasifican en:

- Cultivos con $ARIS \geq 0,80$: zanahoria, maíz y cebolla (en los dos primeros años) y todos los cultivos, salvo el sorgo en 2012-2013. En este grupo casi se alcanza la máxima producción por lo que se considera que se realiza un manejo de riego adecuado alcanzándose el rendimiento máximo de los cultivos.
- Cultivos con $0,5 < ARIS < 0,80$: alfalfa, judías, remolacha azucarera (en los dos primeros años), sorgo (en los dos últimos años), cebada (2010-2011) y patata (2011-2012).
- Cultivos con $ARIS \leq 0,50$: girasol y trigo (en los dos primeros años), patata y sorgo (2010-2011) y cebada (2011-2012).

El valor medio del índice ARIS fue: 0,70, 0,62 y 1,11, respectivamente, en los tres años de funcionamiento de la CCRR. El análisis estadístico muestra diferencias significativas entre el tercer año y los dos primeros. Los valores $ARIS < 1$ de los dos primeros años indican que las aportaciones del riego estuvieron limitadas, lo que podría deberse a los criterios en el manejo de riego y/o la insuficiencia de los recursos hídricos destinados al regadío. Según la información proporcionada por la CCRR, el primer año de funcionamiento no dispusieron de agua suficiente para cubrir las necesidades hídricas de los cultivos. En el segundo año, los recursos hídricos disponibles aumentaron pero también se incrementó la superficie regada por lo que la dotación por cultivo se redujo.

Los valores de RRS variaron entre cultivos y campaña de riego. La patata, remolacha azucarera, cebolla y zanahoria tienen los valores más altos debido a las características del producto cosechado. Los valores obtenidos han sido similares a los de otros estudios. En trigo, se observa que la precipitación efectiva aportó casi el 60% de la ET_a por lo que se podría ahorrar agua con un manejo del riego adecuado aprovechando la precipitación.

La Tabla 2 muestra los valores de los indicadores de productividad de IWP y WP. Se ha considerado un escenario sin restricción de agua que correspondería a una producción de cultivo máxima (en este caso se considera el rendimiento potencial). Los valores de estos indicadores dependen del rendimiento del cultivo y del precio del mercado del producto cosechado. La información obtenida puede utilizarse para comparar la productividad del agua de riego entre cultivos y, por tanto, se podría determinar un patrón de cultivos de referencia para incrementar los ingresos de los regantes y optimizar los recursos de la CCRR.

Los valores IWP por cultivo y año de estudio variaron entre 4,14 (cebolla: 2010-2011) y 0,29 (sorgo: 2011-2012) y los valores WP oscilaron entre 3,24 (cebolla: 2010-2011) y 0,25 (girasol: 2011-2012). La cebolla, patata, zanahoria y cebada fueron los cultivos donde se alcanzaron los valores más altos por lo que se les proponen como patrón de referencia para la CCRR. En cada cultivo, los dos indicadores variaron cada año obteniéndose los valores mayores en el año con mayor precipitación efectiva (2010-2011) aunque no existen diferencias significativas entre los tres años estudiados.

| | IWP (€/m ³) | | | | | | WP (€/m ³) | | | | | |
|---------------------|-------------------------|--------|------|-----------|-----------|-----------|------------------------|--------|------|-----------|-----------|-----------|
| | Húmedo | Normal | Seco | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 | Húmedo | Normal | Seco | 2010-2011 | 2011-2012 | 2012-2013 |
| Alfalfa | | | | 0,48 | 0,42 | 0,52 | | | | 0,36 | 0,33 | 0,41 |
| Cebada | 1,03 | 0,89 | 0,78 | 1,21 | 1,16 | 0,68 | 0,44 | 0,46 | 0,48 | 0,45 | 0,35 | 0,33 |
| Judía | 1,03 | 0,93 | 0,85 | 0,93 | 0,31 | 0,70 | 0,85 | 0,82 | 0,79 | 0,75 | 0,29 | 0,62 |
| Zanahoria | 3,02 | 2,58 | 2,25 | 1,37 | 1,70 | 1,80 | 2,22 | 2,08 | 1,96 | 1,18 | 1,39 | 1,49 |
| Maíz | 0,52 | 0,48 | 0,45 | 0,48 | 0,52 | 0,49 | 0,43 | 0,43 | 0,42 | 0,41 | 0,49 | 0,43 |
| Cebolla | 4,72 | 4,08 | 3,59 | 4,14 | 1,98 | 2,77 | 3,53 | 3,33 | 3,15 | 3,24 | 1,61 | 2,26 |
| Patata | 1,68 | 1,53 | 1,40 | 2,79 | 1,69 | 1,62 | 1,35 | 1,31 | 1,27 | 1,62 | 1,37 | 1,42 |
| Sorgo | 0,44 | 0,41 | 0,37 | 0,88 | 0,29 | 0,68 | 0,36 | 0,36 | 0,35 | 0,54 | 0,26 | 0,55 |
| Remolacha azucarera | 0,49 | 0,43 | 0,38 | 0,51 | 0,51 | 0,46 | 0,40 | 0,37 | 0,35 | 0,41 | 0,43 | 0,40 |
| Girasol | 0,51 | 0,43 | 0,38 | 0,57 | 0,54 | | 0,39 | 0,36 | 0,34 | 0,40 | 0,25 | |
| Trigo | 0,57 | 0,46 | 0,39 | 0,81 | 0,84 | 0,66 | 0,30 | 0,30 | 0,29 | 0,32 | 0,36 | 0,35 |

Tabla 2. Valores de los índices de productividad IWP y WP de los principales cultivos en la CCRR en cada campaña de riego y en los años tipo: húmedo, normal y seco.

Al comparar estos resultados con los del escenario sin restricción de agua, se observa que el riego deficitario mejora el índice IWP en: cebada (2010-2011 y 2011-2012); patata (2010-2011 y 2011-2012); sorgo (2010-2011 y 2012-2013); remolacha azucarera (2010-2011 y 2012-2012), girasol (2010-2011 y 2011-2012) y trigo (en los tres años). Así mismo, la tendencia hacia la producción máxima en maíz (todos los años) y cebolla (2010-2011) ha sido similar a la del escenario sin restricción de agua de riego.

3.3 Efecto del riego y su manejo sobre la producción

En las Figuras 4 y 5 se muestran los resultados de la simulación del efecto del riego sobre la producción del cultivo de patata dentro del intervalo $[1/(3-2CUC); 1/(2CUC-1)]$ de validez del modelo de simulación.

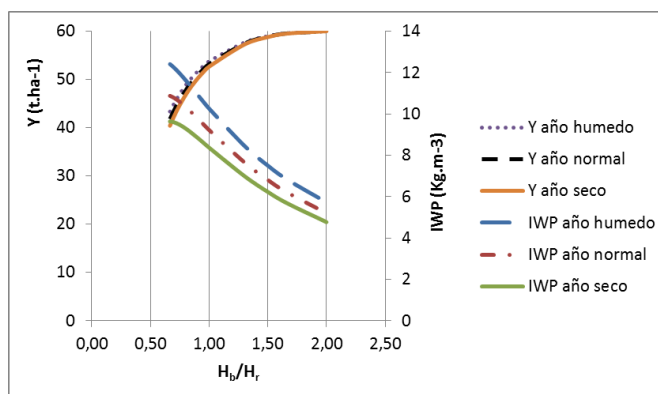


Figura 4. Valores teóricos de IWP y del rendimiento para el cultivo de patata en los años tipo: húmedo, normal y seco.

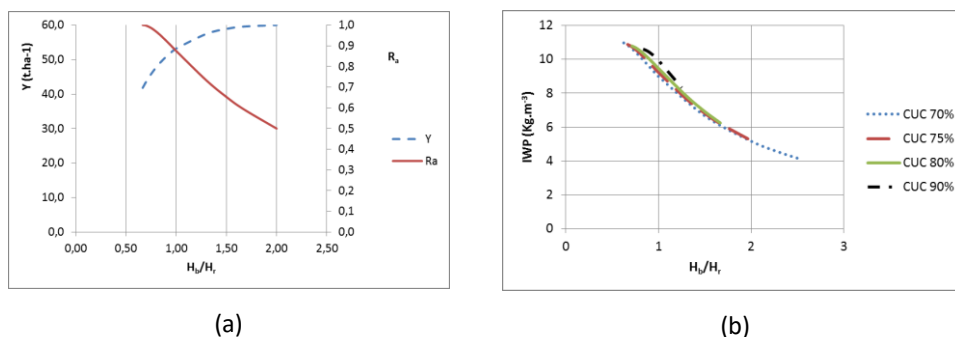


Figura 5. Cultivo de patata: (a) Efecto del rendimiento de la aplicación del riego R_a sobre la producción Y y (b) Valores simulados de IWP según la uniformidad de aplicación del agua.

La Figura 4 muestra el efecto del riego considerando un valor constante de $CUC = 75\%$. Se observa, que para una uniformidad de aplicación del agua dada, la producción del cultivo aumenta hasta un valor de la relación entre lámina bruta y requerida $H_b/H_r = 1,5$ (rendimiento máximo) mientras que la productividad del agua IWP sigue la tendencia contraria. La aplicación de riegos deficitarios (valores $H_b/H_r < 1$) aumenta el índice IWP y, aunque se observan diferencias en los tres años tipo, éstas no son significativas. Valores $H_b/H_r < 1$ llevan además asociados un rendimiento de aplicación del agua de riego R_a adecuado. Por otra parte, en la Figura 5 se observa que para un valor H_b/H_r dado, la productividad del agua mejora al aumentar la uniformidad de la aplicación del agua de riego CUC. La pendiente de la curva IWP - H_b/H_r es más pronunciada al aumentar CUC. Estas relaciones son una herramienta útil a los gestores del agua de la CCRR para proponer estrategias de riego deficitario y, en su caso, seleccionar la láminas de agua para obtener una producción/productividad del agua adecuada.

5. Conclusiones

Las evaluaciones de campo, en las condiciones de manejo habituales de los regantes, de una muestra de sistemas de riego representativos de los existentes en la CCRR "Río Adaja" muestra que la uniformidad de aplicación del agua en el 90% de sus sistemas es buena.

Los riegos en las dos primeros años fueron deficitarios y en el 3º año sin déficit observándose unos valores del índice ARIS de eficiencia en el uso del agua: 0,70; 0,62 y 1,11, respectivamente. Así mismo, el manejo del riego ha sido adecuado en la mayoría de los cultivos ($ARIS \leq 1$ y/o $0,90 \leq ARWS \leq 1,20$) excepto en: judía (2011-2012 y 2012-2013), cebolla (2011-2012 y 2012-2013), sorgo (2011-2012), girasol (2011-2012), cebada (2012-2013), zanahoria (2010-2011 y 2012-2013) y cebolla (2012-2013).

Los indicadores de productividad (IWP y WP) incrementaron con el aumento de la precipitación efectiva, así mismo, mejoraron con el riego deficitario en la mayoría de los

cultivos. Los cultivos cebolla, patata, zanahoria y cebada se proponen como referencia para incrementar los ingresos a los regantes por sus índices WP y IWP (€/m³) altos.

El riego deficitario puede ser una estrategia para mejorar la eficiencia y productividad en el uso del agua de la CCRR siempre que lleve asociado un manejo del riego adecuado que resulta, relativamente, más fácil cuando se dispone de sistemas de riego con una uniformidad de aplicación alta. Sin embargo su aplicación resultaría ineficaz en los cultivos de remolacha azucarera y maíz cuando no se alcancen los umbrales del coeficiente de uniformidad de Christiansen $CUC \geq 75\%$ y $CUC \geq 65\%$ para remolacha azucarera y maíz, respectivamente.

Referencias

Andrés, R., Cuchí, J. A. 2014. Analysis of sprinkler irrigation management in the LASESA district, Monegros (Spain). *Agricultural Water Management* 131, 95-107.

Clemmens, A. J. y Molden D.J. 2007. Water uses and productivity of irrigation systems. *Irrig. Sci.*, 25, 247-261.

Corominas, J. 2010. Agua y energía en el riego en la época de la sostenibilidad. *Ingeniería del Agua* 17, 1134-2196.

De Juan, J. A., Tarjuelo, J. M., Valiente, M. y García, P. 1996. Model for optimal cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. I: Development of a decision model. *Agricultural Water Management* 31, 115-143.

Doorenbos, J. y Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage Paper* No. 33, FAO, Rome, Italy, 193 pp.

Droogers, P. y Kite G. 1999. Water productivity from integrated basin modeling. *Irrigation and Drainage Systems*, 13, 275-290.

ISO 11545. Agricultural irrigation equipment-Center-pivot and moving lateral irrigation machines with sprayer or sprinkler nozzles-Determination of uniformity of water distribution.

ISO 7749-2. Irrigation equipment-Rotating sprinklers-Part2: Uniformity of distribution and test methods.

Keller, J. y Bliesner R.D. 2000: *Sprinkle and Trickle Irrigation*. The Blackburn Press. Caldwell, New Jersey.

Losada, A. 2005. *El riego: II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica*. Editorial MundiPrensa, Madrid, España, 256 pp.

Lorite, I.J., Mateos, L. y Fereres, E. 2004. Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. I. Model and general assessment of an irrigation scheme. *Irrig.Sci.* 23, 77-84.

MAGRAMA. 2008. Plan Nacional de regadíos-horizontes 2008. <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-sostenible-de-regadios/plan-nacional-de-regadios/texto-completo/default.aspx#para1>.

Mantovani, E. C., F. J. Villalobos, F. Orgaz y E. Fereres. 1995. Modeling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agricultural Water Management* 27: 243-257.

Moreno-Pérez, .M., F. y Roldán-Cañas, J. 2013. Assessment of irrigation water management in the Genil-Cabra (Córdoba, Spain) irrigation district using irrigation indicators. *Agricultural Water Management* 120, 98-106.

Naroua I., Rodríguez-Sinobas, L. and Sánchez-Calvo, R., Rodríguez-Ros, J. 2012. Evaluación de los Sistemas de Riego por Aspersión en la Comunidad de Regantes "Río Adaja" y propuestas para la mejora del manejo del riego. XXX Congreso Nacional de Riegos AERYD, Albacete (España).

Pereira, L. S., Cordery, I. e Iacovides, I. 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. *Agricultural Water Management* 108, 39-51.

Playán, E. y Mateos, L. 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agricultural Water Management* 80, 100-116.

Tarjuelo, J. M., de Juan, J. A., Valiente, M. y García, P. 1996. Model for optimal cropping patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. II: A case study of irrigation scheduling in Albacete, Spain. *Agricultural Water Management* 31, 145-163.

Villalobos, F. J., Mateos., L., Orgaz, F. y Fereres, E. 2014. Integrated non-linear model for optimal cropping pattern and irrigation scheduling under deficit irrigation. *Agricultural Water Management* 140, 1–13.