

Análisis del riego por aspersión a baja presión en un cultivo de maíz

N. Zapata, O. Robles, J. Cavero y E. Playán

Departamento de Suelo y Agua. Estación Experimental Aula Dei (CSIC), Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza.

Resumen

Los costes eléctricos del riego presurizado han experimentado un fuerte incremento en la última década, poniendo en riesgo la viabilidad de muchas explotaciones recién modernizadas. La reducción de la presión de trabajo en el aspersor se analiza en este trabajo como una alternativa para reducir los costes de la factura eléctrica. Para ello se realizó un diseño experimental en el que se analizaron tres tratamientos, uno de presión en boquilla estándar, 3 kg/cm^2 , y dos de baja presión, 2 kg/cm^2 . El tratamiento de presión estándar y uno de los de baja presión se equiparon con aspersores de impacto convencionales de latón, mientras que el otro tratamiento de baja presión se equipó con aspersores de plástico con placa deflectora en la pala. El ensayo se realizó sobre un cultivo de maíz a lo largo de dos campañas de cultivo, 2015 y 2016. Los tres tratamientos se regaban a la vez, asegurando una dosis y unas condiciones de riego similares. Se evaluó la calidad del riego (uniformidad y pérdidas de agua por evaporación y arrastre) instalando mallas pluviométricas en cada tratamiento en la campaña 2016. Se analizó el crecimiento del maíz, el rendimiento y sus componentes. La uniformidad de riego estacional en la campaña 2016 fue claramente superior en el tratamiento de presión estándar que en los tratamientos de baja presión (diferencias de hasta un 10%). Sin embargo, las pérdidas por evaporación y arrastre fueron ligeramente inferiores en los tratamientos de baja presión (aproximadamente un 3%). En cuanto al rendimiento en grano, no se encontraron diferencias significativas entre ninguno de los tratamientos. La reducción de presión de 3 a 2 kg/cm^2 en boquilla de aspersor reduce los costes de la factura eléctrica sin afectar a la producción del cultivo de maíz, lo que incrementa el beneficio neto de las explotaciones.

Introducción

La superficie de regadío con sistemas presurizados en España se ha incrementado en el periodo 2005-2015 (un promedio del 0.55 % anual) debido a los Planes de Modernización de Regadíos. El año 2015, se regaron por aspersión 558.834 ha (MAPAMA, 2015). Los costes de inversión y explotación de las zonas modernizadas obligan a las asociaciones de usuarios a ser eficientes con el uso del agua y sobre todo con el uso de la energía. Diversos estudios se han enfocado a mejorar la eficiencia energética mediante la optimización del funcionamiento de las infraestructuras, especialmente de las estaciones de bombeo (Moreno et al. 2007; Córcoles et al. 2016) o mediante la implementación de técnicas de manejo, como la sectorización de la red (Rodríguez-Díaz et al. 2009; Moreno et al. 2010b; Fernández-García et al., 2013). Sin embargo es necesario avanzar prestando atención a todo el sistema de riego en conjunto, desde la parcela hasta la estación de bombeo.

El diseño tradicional de un sistema de riego por aspersión en cobertura total asegura una presión mínima de 3 kg/cm^2 (300 kPa) en la boquilla de los aspersores de impacto. Disminuir esta presión a 2 kg/cm^2 (200 kPa) sin afectar al espaciamiento entre aspersores y manteniendo

los estándares de calidad de riego y principalmente la producción del cultivo, supondría un ahorro considerable de energía y una mejora de la rentabilidad de las explotaciones.

Playán et al. (2006) analizaron las diferencias en el patrón de distribución de agua de un aspersor de impacto trabajando a 3 kg/cm² y a 2 kg/cm² de presión en boquilla, y concluyeron que las diferencias en el alcance del aspersor no eran muy relevantes. También analizaron las diferencias en uniformidad de riego de ambas presiones en boquilla en una cobertura de aspersión (18 m x 15), concluyendo que las diferencias eran poco importantes (<5%), siendo la uniformidad más alta en la presión estándar de 3 kg/cm².

La presión de 3 kg/cm² es adecuada para generar un patrón de distribución cónico, que resulta óptimo cuando se solapan los aspersores que configuran una cobertura de riego. Por otro lado, cuando el aspersor trabaja a una presión de 2 kg/cm² genera una distribución que a menudo se asemeja a un anillo, con un pico de pluviometría en una corona circular que al solaparse no produce una uniformidad de distribución muy alta. Kincaid (1991), propuso agregar una placa deflectora a la pala con el objetivo de romper el chorro para disgregarlo mejor, y así mejorar el patrón de distribución y su solape final. Este deflector hace la función de aportar agua a la parte menos regada de la distribución anular, es decir las zonas más cercanas al aspersor.

Este trabajo analiza las posibilidades de reducir la presión en boquilla del aspersor de 3 a 2 kg/cm². Para ello se analiza el efecto que esta reducción tiene en la calidad del riego y en la producción de un cultivo de maíz a lo largo de dos campañas de riego.

Material y Métodos

El experimento se realizó en un campo de la Estación Experimental de Aula Dei del CSIC localizada en Montañana, Zaragoza. El campo, con una superficie de 2 ha, está dividida en 14 sectores de riego, de los cuales solo 12 forman parte del ensayo y los otros dos riegan las bordaduras de la parcela. Cada sector se corresponde con una parcela experimental y está regado por cuatro aspersores en una disposición cuadrada de 18 m x 18 m (324 m²), cuyo riego está controlado por una válvula hidráulica (Figura 1). Los aspersores están instalados en una caña que los sitúa a 2,5 m sobre el suelo. Los bordes de las parcelas (válvulas V1 y V14) se regaron independientemente del resto del ensayo. Los tres tratamientos, cada uno con cuatro repeticiones, se distribuyeron al azar entre las 12 parcelas experimentales (Figura 1).

Los tratamientos se corresponden con, 1) aspersor de impacto metálico Costa RC130 con doble boquilla de latón (4,4 mm y 2,4 mm) operando a 3 kg/cm² (AC3); 2) aspersor de impacto metálico Costa RC130 con dos boquillas de plástico (5,16 mm y 2,5 mm) operando a presión de 2 kg/cm² (AC2); 3) aspersor de impacto de plástico con placa deflectora en la pala NaanDanJain 5035, con doble boquilla de plástico (5,16 mm y 2,5 mm) operando a una presión de 2 kg/cm² (APD2). Los mayores diámetros de las boquillas de los tratamientos de baja presión compensan la menor presión de funcionamiento, dando lugar a una tasa de aplicación similar en los tres tratamientos (5,0 mm/h). Los tres tratamientos se regaron siempre al mismo tiempo. La presión en cada sector se mantuvo de acuerdo al tratamiento correspondiente, con un regulador de presión instalado en cada válvula de sector (Figura 1). La presión de operación de cada sector se supervisó en cada riego colocando un transductor de presión (Dickson, PR150) con registro en continuo (cada 5 minutos) en la caña de uno de los aspersores de cada parcela experimental. Junto al transductor también se instaló un manómetro de lectura directa que permitía supervisar manualmente la presión de trabajo de cada riego (Figura 1).

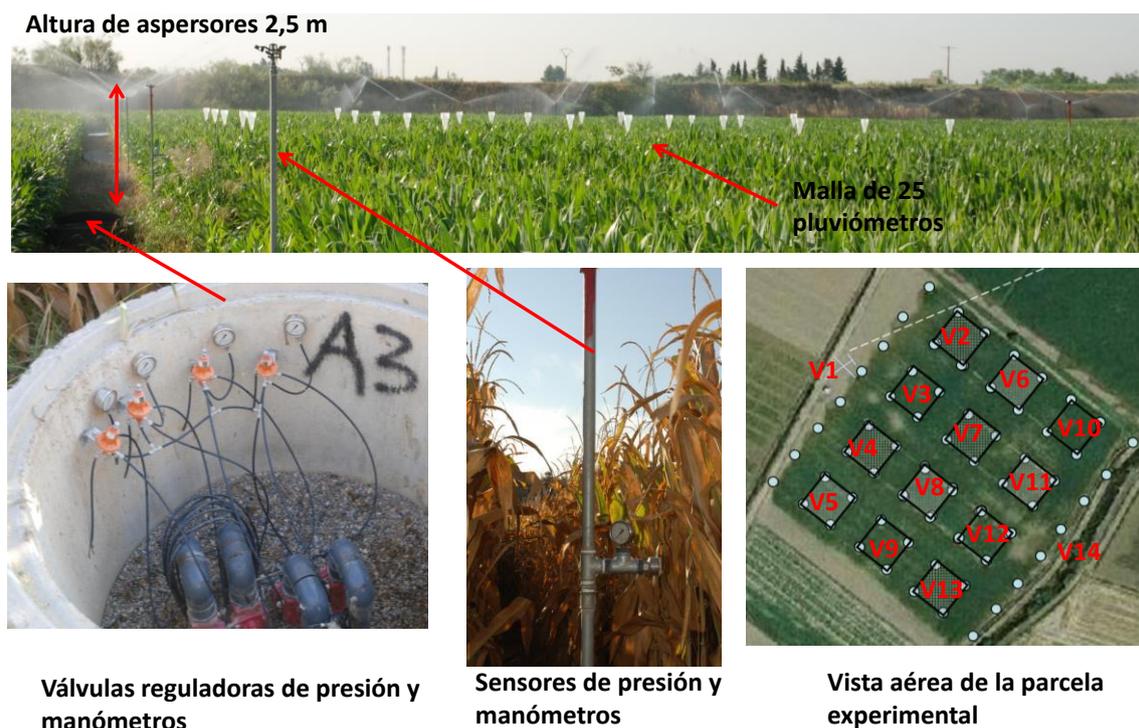


Figura 1. Vista de parcela experimental y localización de sectores de riego, instalación de una malla de pluviómetros, sistema de regulación de presión y transductores de presión y manómetros.

El año anterior al ensayo se cultivó alfalfa. El 14 de abril en 2015 y el 13 de abril en 2016, se sembró maíz (Pioneer P1758) con una densidad de 89.500 semillas/ha. La fertilización consistió en 64 kg/ha de N, 120 kg/ha de P_2O_5 y 120 kg/ha de K_2O aplicados antes de la siembra de 2015, y 100 kg/ha de N como solución N-32 aplicado con el agua de riego en el estadio de 9 hojas. En el año 2016 se aplicó la misma fertilización en presiembra y 2 aplicaciones de 100 kg/ha de N como solución N-32 también con el agua de riego, una en el estadio de 6 hojas y la otra en el de 12 hojas.

Las necesidades de riego se calcularon a partir de la evapotranspiración de referencia y los coeficientes de cultivo, calculados mediante la ecuación de la integral térmica propuesta por Martínez-Cob (2008) en la zona. Los datos agrometeorológicos y la evapotranspiración de referencia se obtuvieron de la estación de Montañana de la red SIAR, localizada a 500 metros del ensayo. Se consideró una precipitación efectiva del 75% y una eficiencia de riego del 85%. Al inicio del ciclo del cultivo se aplicaron riegos cortos, de una hora, para promover la nascencia. Tras la emergencia del cultivo, la duración de los riego se extendió a tres o cuatro horas y la frecuencia de riego también fue variando a lo largo de la campaña, pasando de uno a tres riegos semanales, en función de las necesidades del cultivo.

Para evaluar los riegos aplicados al maíz se instalaron en una de las repeticiones de cada tratamiento mallas de 25 pluviómetros homogéneamente distribuidos en el marco de aspersión (Figura 1). Los pluviómetros se instalaron inicialmente a una altura sobre el suelo de 1 m. En 2016 los pluviómetros se fueron elevando a medida que el cultivo crecía para evaluar la calidad estacional del riego. Con los datos de los pluviómetros se obtuvieron el coeficiente de uniformidad (CU) y las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) de cada riego. En 2016 se determinó la calidad estacional del riego para cada tratamiento.

Se realizaron diversas medidas agronómicas en maíz (Figura 2). La altura de planta se midió cuando el cultivo había alcanzado la altura máxima (tras floración), en el mes de julio en ambas campañas, 2015 y 2016. Para ello en cada parcela experimental se seleccionaron 20 puntos de

medida distribuidos de forma homogénea y se midió la altura de planta con una regla de precisión centimétrica.

Se determinó la radiación fotosintéticamente activa (RFA) interceptada por el cultivo en agosto de 2015 y julio de 2016. Se realizaron 12 lecturas en cada subparcela utilizando un sensor BF3 y un ceptómetro. Las lecturas se realizaron alrededor de las 12:00 del mediodía solar.

Se determinó mediante muestreo manual la biomasa aérea antes de la cosecha mecánica, el 28 de septiembre en ambas campañas, 2015 y 2016. Se cosechó a mano la parte aérea de un área de 4,5 m² por parcela experimental, separándose el grano de la planta y del zuro, que se secaron en estufa a 60°. Durante la cosecha manual también se determinó el número de plantas. Cada parcela experimental de 18 m x 18 m se cosechó mecánicamente con una cosechadora comercial, el 30 de septiembre en 2015 y el 5 de octubre en 2016 (Figura 2). La cosecha se pesó en un remolque pesador con precisión de 1 kg, se extrajo una muestra de grano de cada subparcela para medir la humedad del grano y determinar el peso de mil granos. Se realizaron comparaciones entre los tres tratamientos mediante análisis estadístico ANOVA, de todas las variables medidas.



Figura 2. Procedimiento de medición de altura de planta (a), medición de radiación fotosintéticamente activa interceptada por el maíz (b), cosecha manual de plantas en cada parcela (c) y cosecha final de cada parcela con cosechadora comercial (d).

Resultados y discusión

La evapotranspiración de referencia de las campañas de cultivo 2015 (952 mm) y 2016 (924 mm) fue cercana a la del año medio (927 mm) de la serie temporal disponible en la estación de Montañana (1995-2016). La precipitación en ambas campañas (116 mm en 2015 y 130 mm en 2016) estuvo por debajo de la media estacional de la serie meteorológica disponible (170 mm). En cuanto a la velocidad media del viento, las campañas de cultivo fueron menos ventosas, (2,2 m/s en 2015 y 2,3 m/s en 2016), que el año medio de la serie temporal (2,4 m/s).

En el año 2015 se aplicaron 661 mm de agua distribuidos en 43 riegos, mientras que en 2016 se aplicaron 659 mm, en 47 riegos. La presión en boquilla medida con los transductores mostró valores estables en ambas campañas, siendo los valores medios de la campaña 2016 ligeramente superiores a los de la campaña 2015.

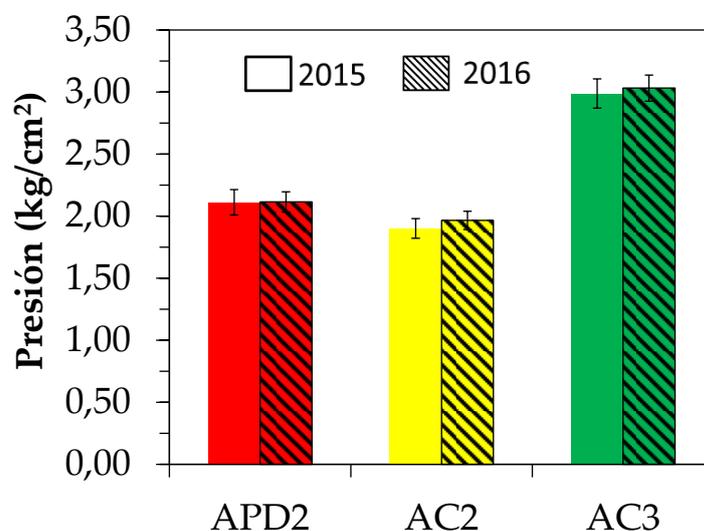


Figura 3. Promedio estacional de las presiones registradas con los transductores de presión para cada tratamiento en ambas temporadas 2015 y 2016. Se presenta también la variabilidad estacional.

Del tiempo de riego total, el 12% se regó en condiciones muy ventosas (velocidad del viento superior a 4 m/s) en ambas campañas de riego. El 33% y el 21% del tiempo de riego en 2015 y 2016, respectivamente, se aplicaron riegos en condiciones de viento medio (velocidad entre 2 y 4 m/s). El 55% y el 67% del tiempo, en 2015 y 2016, respectivamente, se regó en condiciones de viento flojo (velocidad menor de 2 m/s).

En 2015 sólo se evaluaron 6 riegos ya que los pluviómetros se instalaron a 1 m y cuando la altura del cultivo sobrepasó los pluviómetros estos se retiraron. Sin embargo en 2016, tras los primeros 5 riegos, los pluviómetros se elevaron a 2 m, con lo que se evaluaron otros 13 riegos. Posteriormente los pluviómetros se elevaron a 2,5 m sobre el suelo, lo que permitió evaluar otros 18 riegos.

La Figura 4 presenta los mapas de distribución de agua recogida en las mallas pluviométricas en dos eventos de riego de la temporada 2015, uno con viento bajo de 1 m/s y otro con viento alto de 4,5 m/s. Se observó mayor CU en el tratamiento de mayor presión (AC3) respecto a los de baja presión en condiciones de viento bajo, aunque las diferencias entre tratamientos son mínimas y todos los valores de uniformidad están por encima del valor mínimo de referencia para un riego adecuado (84%). En condiciones de viento alto las uniformidades disminuyen drásticamente hasta un mínimo de 66% (APD2). Los valores de uniformidad de riego estacional sólo están disponibles para la campaña 2016, ya que en ella se evaluaron la mayoría de los riegos (36 riegos). En esta campaña, el mayor coeficiente de uniformidad estacional se dio en el tratamiento de presión estándar a 3 kg/cm² (AC3) y fue de 93%. Los valores estacionales de CU de los tratamientos de baja presión fueron de 84% para AC2 y 82% para APD2. También se constató que las diferencias de CU entre el tratamiento de presión estándar y los de baja presión se incrementan a medida que la malla pluviométrica se elevaba. Sánchez et al. (2010) indicaron que la uniformidad medida mediante mallas pluviométricas disminuía a medida que la distancia entre la boquilla del aspersor y la boca del pluviómetro se acortaba. En este trabajo hemos visto que esta disminución de la uniformidad del riego a medida que subimos los pluviómetros es mayor en los tratamientos de baja presión. Las diferencias en la trayectoria del chorro entre las dos presiones de trabajo pueden explicar estas diferencias.

En 2016 las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA) estacionales fueron mayores en el tratamiento AC3 (17%) que en los tratamientos de baja presión AC2 (13%) y APD2 (15%). En los tres tratamientos las PEA disminuyen al aumentar la altura de los pluviómetros. Al disminuir la distancia de vuelo de las gotas, el tiempo de oportunidad para que las gotas sean arrastradas o evaporadas también disminuye, lo que se traduce en valores menores de pérdidas. Sin embargo, las diferencias en PEA entre alturas de pluviómetros fueron sensiblemente menores en el tratamiento AC3 que en los tratamientos de baja presión.

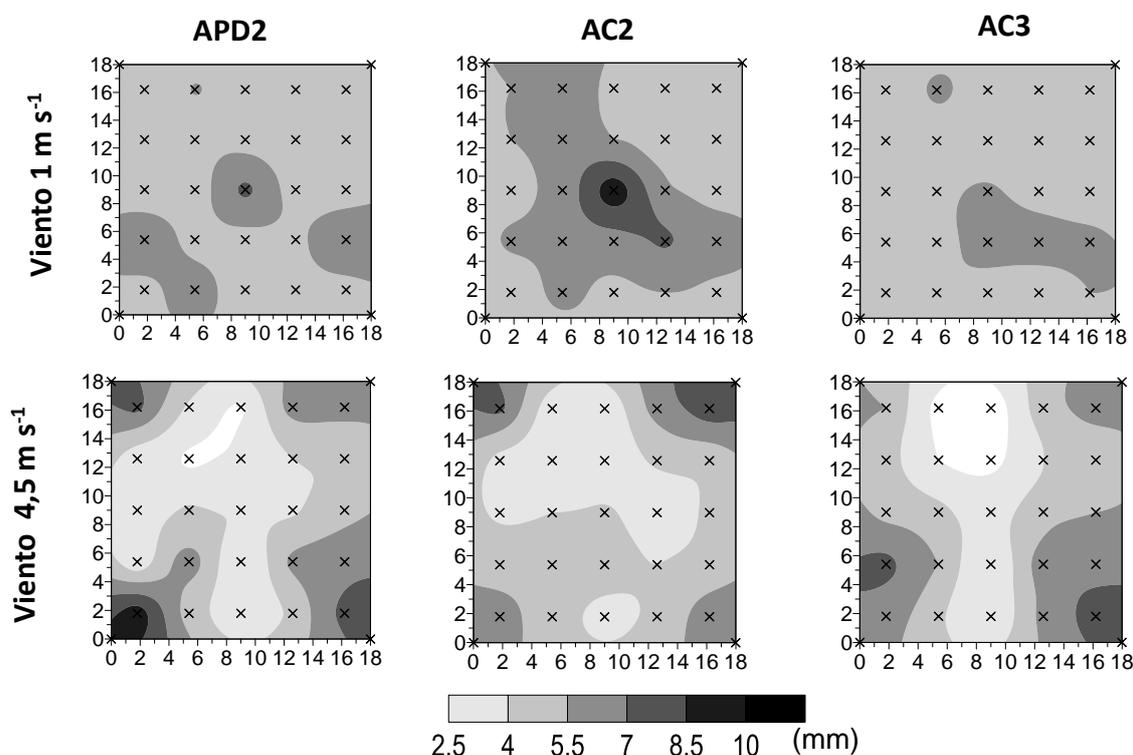


Figura 4. Mapas de distribución de agua de una parcela de cada tratamiento durante dos ensayos diferentes (viento bajo, 1 m s^{-1} , y viento alto, $4,5\text{ m s}^{-1}$) en la temporada 2015.

La altura del maíz no presentó diferencias significativas entre tratamientos en la campaña 2015, mientras que en la campaña 2016 la altura de planta del tratamiento APD2 (2,1 m), resultó ligeramente inferior a la de los otros dos tratamientos (2,2 m para AC3 y AC2). La altura de planta del año 2016 (media de 2,16 m) fue superior a la de 2015 (media de 1,93 m) en los tres tratamientos. La radiación fotosintéticamente activa absorbida por el cultivo (RFA) no presentó diferencias significativas entre tratamientos, ni en 2015 ni en 2016. Los valores medidos de RFA fueron ligeramente superiores en 2016 (96,4%) que en 2015 (91,8%).

La Tabla 1 presenta los valores medios por campaña de riego y tratamiento de la densidad de plantas, la biomasa aérea, el peso medio de un grano y el índice de cosecha. Ni la densidad de plantas, ni el peso de un grano, ni el índice de cosecha presentaron diferencias significativas entre tratamientos en ninguna de las dos campañas de cultivo. La biomasa aérea tampoco presentó diferencias significativas entre tratamientos en 2015. Sin embargo, en 2016 la biomasa aérea del tratamiento AC2 presentó valores estadísticamente diferentes (mayores) que los del resto de tratamientos.

Tabla 1. Valores medios de densidad de planta, biomasa aérea, peso de un grano e índice de cosecha en ambas temporadas de maíz (2015 y 2016) para cada tratamiento. Se proporcionan también los valores promedio de cada temporada.

Tratamiento	Densidad plantas (plantas/ha)		Biomasa aérea (Tn/ha)		Peso grano (mg/grano)		Índice cosecha (-)	
	2015	2016	2015	2016	2015	2016	2015	2016
APD2	83.889a	86.667a	25,8a	24,1a	364a	393a	0,48a	0,57a
AC2	85.556a	86.667a	26,4a	28,1b	357a	387a	0,49a	0,53a
AC3	86.667a	90.000a	23,1a	25,8a	360a	387a	0,49a	0,56a
Promedio	85,371	87,778	25,1	26,0	360	389	0,49	0,55

Para cada variable y año, los números seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes de acuerdo a la prueba LSD de Fisher al nivel P=0,05.

Los resultados de la cosecha mecánica del grano por tratamiento y año se presentan en la Figura 5. En 2016 la producción en grano no presentó diferencias significativas entre tratamientos. En 2015 la producción en grano resultó significativamente inferior en el tratamiento de presión estándar AC3, que en los tratamientos de baja presión. Este resultado es llamativo, ya que cabría esperar el resultado contrario. La explicación la encontramos en las parcelas V11 y V13, que formaron parte del tratamiento AC3 en 2015, y que presentaron problemas de nascencia que se fueron arrastrando y llegaron a afectar al rendimiento. Si en este año 2015 se eliminan del tratamiento AC3 dichas parcelas V11 y V13, y volvemos a realizar el análisis estadístico, los resultados indican que tampoco hubo diferencias significativas entre tratamientos en la producción en grano.

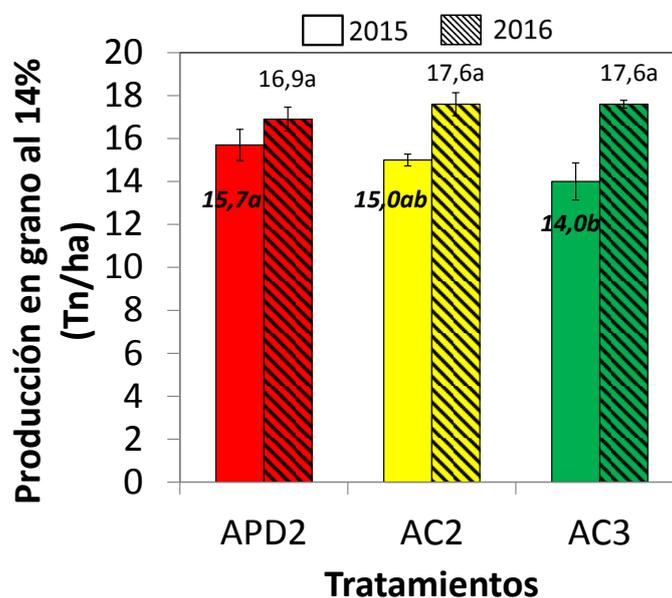


Figura 5. Resultados de la cosecha mecánica de grano. Valores promedio de cosecha grano para los tres tratamientos y las dos campañas de riego, 2015 y 2016. La variabilidad dentro de cada tratamiento se muestra con las barras de error. Para cada tratamiento y año los números seguidos de letras diferentes son significativamente diferentes al 95% de confianza.

Conclusiones

Las diferencias en la uniformidad de riego estacional entre el tratamiento de presión estándar, AC3, y los de baja presión, AC2 y APD2, son relevantes ($\approx 10\%$), sin embargo no tuvieron repercusión en el rendimiento puesto que no hubo diferencias significativas en esta variable entre tratamientos. La redistribución del agua de riego por el cultivo y por el suelo amortiguaron el efecto de la diferente uniformidad medida sobre la cubierta vegetal. Por otro lado las menores pérdidas por evaporación y arrastre de los tratamientos de baja presión - aunque ligeras ($\approx 3\%$) - pueden asimismo explicar que las diferencias en uniformidad medidas sobre la cubierta no hayan afectado a la producción.

El riego por aspersión a 2 kg/cm^2 en boquilla, con aspersor de latón convencional o con aspersor con placa deflectora, no produjo merma de la producción comparado con un tratamiento de presión estándar, 3 kg/cm^2 .

La reducción de presión de trabajo de 3 a 2 kg/cm^2 disminuye los costes de la factura eléctrica sin afectar a la producción del cultivo, lo que incrementa el beneficio neto de las explotaciones

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por MINECO del Gobierno de España a través del proyecto AGL2013-48728-C2-1-R. Octavio Robles disfruta de un contrato predoctoral financiado por MINECO, BES-2014-069713. Gracias también al apoyo del personal de la EEAD-CSIC y del CITA-DGA: Eva Medina, Pilar Paniagua, Miguel Izquierdo, Miguel A. Millán, Vicente Villarroya, César Romano, Pablo García y Laura Pérez.

Bibliografía

- Córcoles, J.I., Tarjuelo, J. M., Moreno, M. A. (2016). Methodology to improve pumping stations management of on-demand irrigation networks. *Biosyst. Eng.*, Vol: 4 pp: 94-104.
- Fernandez-Garcia, I., Rodríguez Díaz, J.A., Camacho Poyato, E., Montesinos, P., (2013). Optimal operation of pressurized irrigation networks with several supply sources. *Water Resour Manag Vol: 27*, pp: 2855-2869.
- Kincaid, D.C. (1991). Impact sprinkler pattern modification. *Trans. ASAE*, No. 34, Vol: 6, pp: 2397-2403.
- MAPAMA (2015). Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos (ESYRCE). Informe de regadíos en España. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Secretaría General Técnica.
- Martínez-Cob (2008). Use of thermal units to estimate corn crop coefficients under semiarid conditions- *Irrig Sci*, Vol:26, pp: 335-345.
- Moreno, M.A., Ortega, J.F., Córcoles, J.I., Martínez, A., Tarjuelo, J.M., (2010). Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency. *Irrig Sci Vol: 28*, pp: 445-460.
- Moreno, M. A., Pelayo, J., Córcoles, J. I., Planells, P., Carrión, P. A., Tarjuelo, J.M. (2007). Measurement and improvement of the energy efficiency at pumping stations. *Biosyst. Eng.*, Vol: 98, pp: 479-486.
- Paniagua, M.P. (2015). Mejora del riego por aspersión en parcela. Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 261 p.
- Playán, E., Zapata, N., Faci, J.M., Tolosa, D., Pelegrín, J., Salvador, R., Lafita, A. and Sánchez, I., (2006). Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agric. Water Manage.*, No. 84, Vol: 1-2, pp: 89-100.
- Rodríguez Díaz, J.A., López Luque, R., Carrillo Cobo, M.T., Montesinos, P., Camacho Poyato, E., (2009). Exploring energy saving scenarios for on demand pressurized irrigation networks. *Biosyst. Eng. Vol: 104*, pp: 552-561.
- Sánchez I., Zapata N. and Faci J.M. 2010. Combined effect of technical, meteorological and agronomical factors on solid-set sprinkler irrigation. II. Modifications of the wind velocity and of the drops interception plane by the crop canopy. *Agric. Wat. Manage.* 97(10): 1591-1601.
- Zapata, N., Latorre, B., Citoler, F.J., Gallinat, J., Bescós, M., Castillo, R., Mantero, N., Burguete, J., Playán, E., (2015). Collective irrigation network design and management for energy optimization: the "Cintegral" tool. ICID 26th Euro Mediterranean Regional Conference and ICID 56th International Executive Council. Innovate to Improve Irrigation Performance. Montpellier, France. 11-16 october 2015.