

5. Riego mecanizado: ensayos de uniformidad y eficiencia de los diferentes tipos de emisores

J.N. Ortíz; J.A. de Juan y J.M. Tarjuelo

José Nicolás Ortíz. Decanato de Agronomía: Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado". Barquisimeto- Venezuela. Contacto: jortiz@ucla.edu.ve

José Arturo de Juan Valero: Investigador, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha. Contacto: Arturo.Juan@uclm.es

José María Tarjuelo: Investigador, Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha. Contacto: jose.tarjuelo@uclm.es

5.1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del tipo de emisor y su altura sobre las pérdidas por evaporación y arrastre (PEA), la uniformidad de aplicación de agua con el riego (CU), la uniformidad del agua en el suelo (CUS) y la uniformidad de producción del cultivo utilizando un equipo pivote con dos tipos de emisores (uno de plato giratorio [EPG] y otro de plato fijo [EPF]) y dos alturas (1 y 2.5 m) sobre el suelo. El experimento se desarrolló durante tres campañas de riego en una parcela de 18 ha ubicada en Albacete, España. Los resultados muestran que las PEA fueron significativamente superiores en los emisores de plato fijo colocados a 2,5 m de altura (EPF 2,5) respecto a los emisores de plato giratorio ubicados a 1 m de altura (EPG 1), con cifras de 8,0 y 13,7% para los riegos nocturnos y diurnos respectivamente. Los menores valores de PEA se registraron en el EPG 1, con cifras de 3,3 y 8,2%, para los riegos nocturnos y diurnos, respectivamente. Los EPG consiguen mayor uniformidad de aplicación de agua (CU de 90-95%) que los EPF (CU de 80-85%), siendo poco afectados por el viento. El valor de uniformidad correspondiente al conjunto de riegos acumulados (CUA) con equipos pivote recoge mejor el efecto sobre la producción final del cultivo que los valores correspondientes a riegos individuales. Este efecto es mucho más importante en los EPF, por la forma que tienen de aplicar el agua.

Conseguir una uniformidad de aplicación con riego por aspersión en torno $CU \approx 80\%$ en riegos individuales, puede ser suficiente para alcanzar una buena uniformidad de producción, ya que los correspondientes CUS del agua en el suelo puede superar fácilmente el 90%. Valores de $CU > 90\%$ en riegos individuales no incrementan de forma significativa la uniformidad del agua en el suelo. La producción final de la remolacha azucarera ha estado más condicionada por la cantidad de agua disponible en el suelo para el cultivo, que por las escasas diferencias de uniformidad de agua en el suelo que se consiguen con el riego con equipos pivote, siendo los resultados representativos de lo que ocurre en un riego real con este tipo de máquinas.

Palabras clave: Uniformidad de aplicación de agua, uniformidad de agua en el suelo, sistema pivote, emisor de plato giratorio, emisor de plato fijo, remolacha azucarera, diámetro de gota.

Keywords: Water application uniformity, soil water uniformity, centre pivot, rotating spray plate sprinklers, fixed spray plate sprinklers, sugar beet, drop diameters

5.2. Introducción

El uso eficiente del agua y la energía en la agricultura es cada vez más importante dada la tendencia generalizada a disminuir el agua disponible para la agricultura y el incremento del

coste de la energía, lo que condiciona la viabilidad de la agricultura de regadío en muchas zonas del mundo. Para hacer frente a esta realidad, desde finales del siglo XX se viene desarrollando la tecnología de aspersores para máquinas de riego (pivotes y laterales de avance frontal) que trabajan a baja presión para responder al incremento del coste de la energía (Kincaid et al., 1996; King and Kincaid, 1998). La uniformidad de aplicación del agua con el sistema de riego condiciona el consumo de agua y energía, así como la producción del cultivo y el posible impacto ambiental del regadío (Louis y Selker, 2000; McLean et al., 2001).

Los aspersores más modernos que se utilizan en los equipos pivote en las últimas décadas tratan de conseguir una gran proporción de tamaños de gota medio (entre 1,5 y 4 mm de diámetro) y un buen alcance (de 8 a 12 m, o más), trabajando a baja presión (menos de 200 kPa) (Tarjuelo, 1999). Estos tienen además la gran ventaja de permitir variar la altura de instalación respecto al suelo, lo que puede ayudar a reducir las pérdidas por evaporación y arrastre, manteniendo una buena uniformidad de aplicación del agua (Solomon et al., 1996).

Las pérdidas por evaporación en el aire dependen principalmente de (Tarjuelo et al. 2000): la humedad ambiental, la temperatura del aire y del agua, la altura del emisor, el tamaño de la gota y la velocidad del viento, mientras que las pérdidas por arrastre dependen de: la velocidad del viento, del tamaño de las gotas y la distancia que ésta tenga que recorrer hasta llegar al suelo. Lorenzini (2002) estudió el efecto de la temperatura del aire sobre la evaporación en el riego por aspersión, encontrando valores comprendido entre 4,2 y 7,7% cuando la temperatura del aire varió desde 21 a 27 °C. El conocimiento de los factores que afectan a las PEA es importante para desarrollar estrategias de conservación del agua (Tarjuelo et al., 2000).

Kincaid et al. (1986), en un estudio sobre las PEA y uniformidad, en sistemas pivote de baja presión, obtuvieron unas pérdidas de agua por evaporación y arrastre de 12% para la altura de 4m, mientras que, para las alturas de 1 y 2m, generalmente, fueron menores al 5%. Abo-Ghobar (1992) estudió dichas pérdidas, a nivel de campo en clima desértico, en tres sistemas de riego pivote de baja presión, encontrando que las pérdidas promedio fueron de 15.6%, 21.2%,

y 35.8% para las alturas de los emisores respecto al suelo de 1.25 m, 1.75 m y 2.5 m, respectivamente. Playan et al. (2005) encontraron que las PEA en un sistema de avance frontal equipado con emisores de baja presión fueron de 9.8% y 5% durante el día y la noche, respectivamente. Además, concluyen que la velocidad del viento fue la variable más explicativa para predecir las pérdidas nocturnas y diurnas, tanto en sistemas de cobertura total como en lateral de avance frontal, a excepción del riego nocturno en el lateral.

En riego con equipos pivote, la uniformidad de aplicación del agua depende principalmente de la carta de emisores, del tipo de emisor y su espaciado en la máquina, de la altura sobre el suelo o sobre la cubierta vegetal, de la topografía de la parcela, y de la velocidad de movimiento de la máquina para no producir escorrentía (King y Kincaid, 1998). Un incremento en la altura del emisor produce normalmente una mayor uniformidad de riego, pero aumentan las pérdidas por evaporación y arrastre (Faci et al., 2001; Montero et al. 2003). La situación del emisor a menor altura reduce la anchura mojada y aumenta la pluviometría, lo cual puede causar problemas de escorrentía en suelos con baja tasa de infiltración (Faci et al., 2001).

El modelo radial de distribución de agua en los EPG tiene forma trapezoidal, resultando una aplicación de agua más constante en el tiempo, lo cual es positivo para prevenir la escorrentía, debido a la estabilidad de la intensidad de aplicación (Sourell et al., 2003). Los EPF por el contrario, concentran la aplicación de agua en una o dos coronas circulares, lo que aumenta la probabilidad de que se pueda producir escorrentía (Faci et al., 2001).

La velocidad y dirección del viento son los principales factores que distorsionan el patrón de distribución del agua en el riego por aspersión, jugando un papel importante respecto a las pérdidas por evaporación y arrastre (Tarjuelo et al., 1999; Dechmi et al. 2004). La influencia de la velocidad del viento sobre la uniformidad del riego esta relacionada con el tipo de aspersor, diámetro de la boquilla, presión de trabajo y altura de la boquilla respecto a la superficie del suelo (Tarjuelo et al., 1999).

La variación en la velocidad y dirección del viento en los distintos eventos de riego condu-

ce a un coeficiente de uniformidad acumulado más alto que el coeficiente de uniformidad promedio de los eventos de riego individuales (Dechmi, 2002; Martínez, 2004).

El tamaño de gotas es un aspecto importante a tener en cuenta en el diseño de sistemas de riego por aspersión (McLean et al., 2001), por su vinculación con la distorsión del patrón de distribución por efecto del viento, las PEA durante el riego, y la posible reducción de la velocidad de infiltración del suelo si se forma costra en el mismo por la rotura de la estructura con el impacto de la gota (Salomon et al., 1996). Los mejores emisores son los que tienen mayor proporción de gotas de tamaño medio (con diámetros entre 1,5 y 4 mm), evitando las gotas de gran tamaño por ser mayor la energía de impacto sobre el suelo y el cultivo (Kincaid et al., 1996).

La uniformidad del rendimiento de los cultivos, cuando el agua es el único factor limitante, depende de la uniformidad del agua disponible en su zona radicular. Esta, está condicionada por: el efecto de los riegos acumulados, la interceptación del agua por parte de la cubierta vegetal y su posterior distribución, la dinámica del agua en el suelo, y el desarrollo del sistema radicular del cultivo (Stern y Bresler, 1983; Li y Kawano, 1996; Chen et al., 2004). Para el cálculo de la lámina bruta a aplicar a partir de las necesidades de agua requeridas por el cultivo debe utilizarse la uniformidad del agua en el suelo, y no la uniformidad de aplicación de agua por el sistema de riego, incluyendo además el valor correspon-

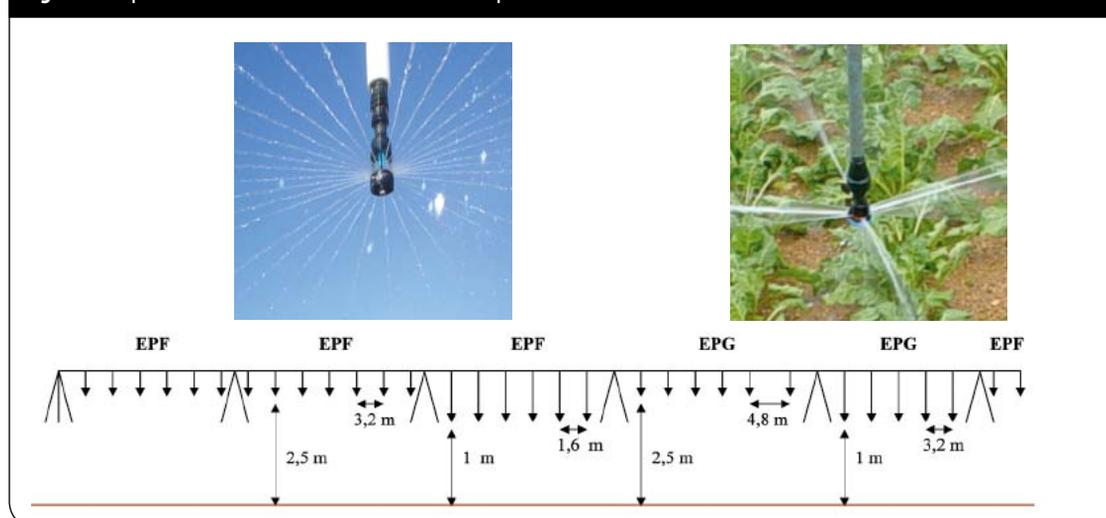
diente al conjunto de riegos, al menos cuando los intervalos entre riegos es inferior a tres o cuatro días (Ortega et al.; 2004a y b).

El objetivo de este trabajo fue estudiar el efecto del tipo de emisor y su altura sobre los pérdidas por evaporación y arrastre (PEA), la uniformidad de aplicación de agua con el riego (CU), la uniformidad del agua en el suelo (CUS) y la uniformidad de producción del cultivo utilizando un equipo pivot con dos tipos de emisores, uno de plato giratorio (EPG) y otro de plato fijo (EPF) y dos alturas (1 y 2.5 m) sobre el suelo.

5.3. Materiales y métodos

El experimento se desarrolló durante los años 2004, 2005 y 2006 en una parcela de 18 ha regada con un equipo pivote, situada en Albacete, España. En el pivote, se sustituyeron los aspersores tradicionales de impacto por los más recientes emisores de baja presión a diferentes alturas respecto a la superficie del suelo, utilizando para ello bajantes flexibles de tubería de polietileno de 25 mm de diámetro. Se instalaron dos tipos de emisores: a) el EPG (Rotator®) en los tres años de experimentación, y b) un EPF tipo LEN®, en el primer año de ensayo, y tipo D3000®, en los dos siguientes años. En el primer tramo, y en el alero, se colocaron emisores de plato fijo (Figura 1). En los tramos T II y T III se colocaron EPF, situados a 2,5 m sobre el suelo en el T II y a 1 m en el T III. En los tramos T IV y T V se colocaron EPG, situado a 2,5 m del suelo en el T IV

Figura 1: Esquema de la colocación de emisores en la máquina.



y a 1m en el T v. En el primer año de ensayo, la separación entre emisores fue de: 3,2m en todos los tramos excepto en T III que se colocaron a 1,6m. En los siguientes dos años la separación fue la misma, a excepción del T IV, que se cambió a 4,8m, para adaptarse a la práctica habitual con este tipo de emisor. En todos los casos los emisores tenían reguladores de presión, con salida a 140kPa, siendo la presión a la entrada de la máquina de 210 kPa, con una tubería de diámetro 168,3mm (6 5/8") y 242m de longitud.

El ensayo se planteó para su realización con un equipo pivot funcionando en condiciones reales de campo. Este diseño experimental tiene dos problemas: 1) La máquina requiere aumentar el tamaño de boquillas al aumentar la distancia al centro pivote, y el diámetro de boquilla ha sido identificado como uno de los factores que condicionan la distribución de tamaños de gota, con posible influencia sobre las PEA y la uniformidad de riego; 2) No es posible realizar repeticiones en la misma máquina. Como consecuencias de estas limitaciones los resultados pueden ser eventualmente diferentes si las distintas combinaciones emisor-altura fueran localizadas en tramos diferentes. Es muy complicado resolver estos problemas sin comprometer otras virtudes experimentales como es el poder ensayar el efecto integrado del incremento de tamaño de boquillas en una máquina real. Actualmente se están llevando a cabo nuevos ensayos, cambiando la localización de las combinaciones emisor-altura en diferentes tramos, para tratar de explicar mejor ese efecto.

Las principales características de los aspersores utilizados en la máquina se muestran en la Tabla 1.

El ensayo se realizó con un cultivo de remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.), ocupando la cuarta

parte del área regada por el centro pivote. Por exigencias del cultivo, fue necesario cambiarlo de lugar en los diferentes años, con lo que también cambió ligeramente el tipo de suelo en cada ensayo. El agua total aplicada (riego más precipitación efectiva [PE]) durante las tres campañas de riego se muestra en la Tabla 2. La PE se estimó a partir de la variación de humedad en los primeros 50 cm del perfil del suelo, considerados como profundidad radicular efectiva del cultivo según muestreos realizados en campo. Se realizaron un total de 38, 79 y 47 riegos durante la primera, segunda y tercera campaña de riegos respectivamente, con dosis medias de riego de 8 a 25mm. El mayor número de riegos en la segunda campaña fue debido a que el suelo tenía menor capacidad de retención, siendo necesarios riegos más ligeros y frecuentes.

En los tres años de experimentación, se realizaron 60 evaluaciones de riego (16 durante el día y 44 durante la noche) siguiendo la metodología propuesta por Merriam y Keller (1978), Merriam et al. (1980) y Heermann (1990), y las Normas Internacionales ANSI/ASABE S436.1 (ASABE, 2001) e ISO-11545 (ISO, 2001). Para esto, se utilizaron pluviómetros de 16 cm de diámetro y 15cm de altura, espaciados 2m siguiendo la dirección de un radio, colocados a 50cm sobre el suelo, manteniéndolos siempre por encima del cultivo.

En cada evaluación, se midió el caudal a la entrada al pivote, así como al inicio y final de cada tramo, utilizando para ello un caudalímetro de ultrasonidos portátil Panametrics, modelo PT 868 (Panametrics Ltd. USA), con una precisión del 2%, previamente calibrado. Estas mediciones permitieron obtener el caudal descargado por cada tramo para luego calcular las PEA como diferencia entre la altura media descar-

Tabla 1. Principales características de la carta de aspersores del pivot.

	Distancia del centro pivote (m)	Diámetro de boquilla(mm)	Espaciamiento entre aspersores (m)	Caudal (m3/h)	Alcance medio (m)
Tramo I EPF 2.5	0 to 50	1.8 – 3.2	3.2	0.2 to 0.5	5 m
Tramo II EPF 2.5	50 to 100	3.4 – 4.6	3.2	0.6 to 1.3	5.5 m
Tramo III EPF 1	100 to 150	3,2 – 4.2	1.6	0.6 to 0.8	4.5 m
Tramo IV EPG 2.5	150 to 200	7.3 – 8.1	4.8	2.5 to 3.2	9 m
Tramo V EPG 1	200 to 238	6.6 – 7.5	3.2	2.1 to 2.7	8 m

EPF: Emisor de plato fijo; EPG: Emisor de plato giratorio.

Tabla 2. Dosis media (mm) recibida por el cultivo (riego + pe) en los diferentes tramos y campañas de riego.

Año	Tramo	Agua recibida por el cultivo (mm)		
		Riego	Pe	Total
Primero	EPF 2.5	654.30	134	788.30
	EPF 1	662.07		796.07
	EPG 2.5	721.90		855.90
	EPG 1	735.47		869.47
Segundo	EPF 2.5	733.28	40	773.28
	EPF 1	745.86		785.86
	EPG 2.5	689.37		729.37
	EPG 1	765.60		805.60
Tercero	EPF 2.5	794.57	95	889.57
	EPF 1	834.03		929.03
	EPG 2.5	753.94		848.94
	EPG 1	806.25		901.25

EPF: Emisor de plato fijo; EPG: Emisor de plato giratorio; PE: precipitación efectiva

gada por los emisores pertenecientes a dicho tramo (AMD) y la altura media recogida por los pluviómetros en cada tramo (AMR). Durante el primer año de ensayo se evaluaron 18 riegos (3 durante el día y 15 durante la noche), durante el segundo año se evaluaron otros 18 riego (4 durante el día y 14 durante la noche) y durante el tercer año se evaluaron 24 riegos (9 durante el día y 15 durante la noche). Los riegos diurnos se realizaron entre las 14 y 16 h, tratando de tener las condiciones de mayor temperatura y evapotranspiración, así como mayor velocidad del viento. Para los riegos nocturnos se programó el equipo pivot para que alcanzara la línea de pluviómetros al amanecer.

Para evitar el efecto borde entre tratamientos solo se consideraron los 30m centrales de cada tratamiento, dejando 10m de borde a cada lado en los tramos de la máquina de 50m. En el último tramo, de solo 38m de longitud, fue necesario colocar dos placas con malla de rafia de 3 m de largo por 1,5m de alto, sujetas a la estructura de la máquina, para tratar de evitar el efecto borde entre tratamientos en esa zona.

Los parámetros meteorológicos se midieron en una estación meteorológica automatizada situada a 150m de la parcela de ensayos. Para cada parámetro se tomaron los valores medios registrados durante el tiempo en que la máquina pasó sobre la línea de pluviómetros.

En cada evaluación, se calculó el coeficiente de uniformidad de Heermann y Hein (CU) y la uni-

formidad de distribución (DU) para cada combinación emisor-altura ensayada (Eq. 1 y 2)

En cada una de las campañas de estudio, también, se calculó el coeficiente de uniformidad

Ecuación 1

$$CU = \left[1 - \frac{\left| \frac{\sum_{i=1}^n S_s}{\sum_{i=1}^n D_s} - \frac{\sum_{i=1}^n D_s S_s}{\sum_{i=1}^n S_s} \right|}{\sum_{i=1}^n D_s S_s} \right] * 100$$

donde: D_s es la lámina de agua (mm) recogida por un pluviómetro a una distancia S (m) desde el centro pivote; s es un subíndice que denota la posición a una distancia S ; n es el número de pluviómetros.

Ecuación 2

$$DU = \frac{AMR_{25}}{AMR} * 100$$

donde: AMR_{25} es la altura media de agua recogida (mm) por el 25% de los pluviómetros que menos agua recogen dentro de cada tramo, ponderada según la distancia al centro pivote; AMR es la altura media de agua recogida (mm) dentro de cada tramo, ponderada según la distancia al centro pivote.

acumulado (CUA) y la uniformidad de distribución acumulada (DUA), considerando la suma de los volúmenes de riego recogidos en cada uno de los pluviómetros en los sucesivos eventos de riegos evaluados.

Los valores de las PEA se relacionaron con datos climáticos, para analizar sus posibles efectos sobre dichas pérdidas, y buscar algún modelo de predicción de las mismas, aunque no hay que olvidar que en las PEA así estimadas se están incluyendo también los posibles errores de medida del caudal y del agua recogida en los pluviómetros, que pueden estimarse en no más del 3%. La información climática considerada fueron la velocidad del viento, la temperatura del aire y la humedad relativa, medidas en una estación climática automatizada situada a 150m de la parcela regada por el pivote.

Para estudiar la distribución del tamaño de gota de los emisores utilizados en los tres años de experimentación, se seleccionaron dos boquillas por tipo de emisor que representaran la gama de diámetros de la carta de emisores (Tabla 1), eligiéndose las boquillas N° 17 (3,37mm) y 23 (4,56mm) en los EPF, y las N° 25 (4,96mm) y 40 (7,98mm) en los EPG. Las mediciones se realizaron en condiciones sin viento y a una presión de 140 kPa. Para el LEN, solo se midieron las gotas caídas a 4,2 m desde el emisor al ser ésta la única distancia de impacto, mientras que en el D3000, se midió a 3,0 y 6,0 m de distancia al tener dos zonas de impacto ya que el emisor descarga agua con dos ángulos de salida.

Para medir el tamaño de gotas se utilizó un Disdrómetro Óptico ODM 470. (Eigenbrodt, Germany). El equipo está basado en la atenuación de un haz de rayos infrarrojos conforme las gotas pasan a través de una ventana óptica (Montero et al., 2006; Burguete et al., 2007). El haz detector tiene forma circular de 20mm de diámetro. Cada gota produce una atenuación de señal, la cual puede ser relacionada con el diámetro de gota y el tiempo de paso. Para caracterizar la distribución de tamaños de gota se calcularon el diámetro medio (DM), el diámetro numérico medio (DNM) y el diámetro volumétrico medio (DVM), (Montero, 1999; Montero et al., 2003b). El DVM, que es uno de los parámetros más importantes, se define como el diámetro que divide el volumen de la descarga en

dos partes iguales, de manera que la mitad del volumen se corresponde con gotas menores al DVM y la otra mitad con gotas de tamaño superior. El DNM se corresponde con la media de los diámetros, sin referencia al volumen. Como el DNM y el DVM están afectados por la proporción de gotas pequeñas y grandes, respectivamente, la relación entre ambos (RD) es un indicador de la distribución de gotas, obteniendo mayor uniformidad de tamaños de gotas cuanto más próximo a uno esté el valor de RD.

El suelo era un Xeric torriorthent (Soil Taxonomy) con textura franca (4% de elementos gruesos, 28% arena fina, 44% limo y 24% arcilla) de acuerdo con USDA (1979). La capacidad de retención de agua en el suelo estimada en los primeros 50cm fue de 0,08m m-1

Para cuantificar la uniformidad del agua en el suelo, durante la segunda y tercera campañas se instalaron 16 tubos de acceso de PVC en los 30m centrales de cada combinación emisor-altura, localizados junto a los pluviómetros utilizados para medir el agua aplicada con la máquina, utilizando un sensor basado en la tecnología de Reflectometría en el Dominio de Frecuencias (FDR): Diviner 2000TM (Sentek Pty Ltd., Stepney, Australia). El equipo fue calibrado en laboratorio siguiendo la metodología descrita por Sentek, 2000 y Martínez, 2004. Las medidas en cada punto se realizaron a intervalos de 10cm, llegando hasta los 60cm de profundidad. Las medidas antes del riego se realizaron a las 8:00 PM para el riego nocturno, y una hora antes de que la máquina pasara por la línea de pluviómetros cuando el riego era diurno. En la segunda campaña de ensayo fue necesario hacer las medidas 15 horas después de cada riego al tener que regar casi diariamente por tratarse de un suelo arenoso franco (79% de arena, en los primeros 60cm), con abundantes elementos gruesos (46,3 %). En la tercera campaña de ensayo, las mediciones se realizaron 24-30 horas después del riego, ya que el suelo era franco arenoso (con 49,6% de arena y 43,1% de elementos gruesos).

Los parámetros de uniformidad del agua en el suelo para cada una de las combinaciones emisor-altura se calcularon con las ecuaciones (3) y (4).

La clasificación climática de Papadakis (1966), sitúa el área de estudio en un clima

Ecuación 3

$$CU_s = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |\theta_i - \theta_m|}{\theta_m \cdot n} \right) * 100$$

donde: CUs, es el coeficiente de uniformidad de la humedad en el suelo a una determinada profundidad (%); θ_i , es el contenido volumétrico de agua en suelo a esa profundidad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondiente al tubo i ; θ_m es la humedad media del suelo en esa profundidad ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) correspondiente a los $n=16$ tubos de acceso de una misma combinación emisor-altura.

Ecuación 4

$$UD_s = \frac{\theta_{25}}{\theta_m} * 100$$

donde: DUs, es la uniformidad de distribución de la humedad en el suelo (%); y θ_{25} , es la media del 25% de valores de humedad más bajo a una profundidad determinada de los 16 puntos muestreados en cada combinación emisor-altura.

Mediterráneo Cálido. La programación de riegos se realizó utilizando el método del balance de agua simplificado en la zona radicular del cultivo, siguiendo la metodología FAO (Pereira and Allen, 1999). La remolacha se sembró directamente tratando de alcanzar 120.000 plantas ha⁻¹. El resto de operaciones de cultivos fueron las normalmente utilizadas por los agricultores en la zona (de Juan et al., 2003).

Para conocer el rendimiento del cultivo y el contenido de azúcar se seleccionaron cuatro parcelas por combinación emisor-altura de 10m² cada una (4 hileras de 5m de longitud).

El análisis estadístico de los resultados se realizó usando el software Statgraphics Plus™ (v. 5.1 para Windows, Statistical Graphics Corp., Herndon, VA, USA). Para determinar las diferencias significativas entre medias de los grupos en el ANOVA, se utilizó el test de Menores Diferencias Significativas (LSD) de Fisher.

5.4. Resultados y discusión

Análisis de las pérdidas por evaporación y arrastre

En la Tabla 3 se presentan el valor medio, máximo y mínimo de las PEA, la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa. Los datos fueron obtenidos en las evaluaciones realizadas durante la noche y el día, en los tres años de ensayo.

Los mayores valores de PEA se obtuvieron con el EPF 2.5, seguido del EPG 2.5 y de los emisores localizados a 1 m, con menor valor para el EPG. Para el mismo tipo de emisor se observa un incremento de las PEA al aumentar la altura, lo que tiene sentido ya que las gotas recorren mayor camino en contacto con el aire. Se obtuvieron menores PEA en los riegos nocturnos, con diferencias significativas entre las distintas combinaciones emisor-altura. En los riegos diurnos solo se encontraron diferencias significativas entre los EPG 1 y los emisores situados a 2,5m sobre el suelo.

Tabla 3. Valores medio y extremos de las PEA y de otros datos climáticos en los ensayos realizados durante el día y la noche, en los tres años de ensayo.

	Value	PEA (%)				W (m/s)	T (°C)	HR (%)
		EPF 2.5	EPF 1	EPG 2.5	EPG 1			
Dia	Mínimo	7.0	4.5	6.2	3.8	1.4	14.8	13.6
	Máximo	26.1	16.2	28.5	18.9	6.2	32.3	85.6
	Medio	13.6(a)	9.2(bc)	12.5(ab)	8.2(c)	3.5	27.4	34.1
Noche	Mínimo	3.0	1.2	2.1	1.0	0.1	7.6	27.9
	Máximo	16.3	13.0	13.1	8.3	3.7	26.7	93.6
	Medio	8.0(a)	4.7(c)	6.3(b)	3.3(d)	1.3	17.4	66.6

W = velocidad del viento; T = temperatura; HR = Humedad relativa.

En la Tabla 4, se presentan los porcentajes de reducción de las PEA durante los riegos nocturnos respecto a las PEA obtenidas en los riegos diurnos, para todas las combinaciones emisor-altura. La mayor reducción de PEA entre riego diurno y nocturno se produce en el EPG 1, llegando a una reducción del 75% respecto a las PEA obtenidas con el EPF 2,5.

Playan et al. (2005), estudiaron las PEA nocturnas y diurnas en una pequeña maquina experimental equipada de EPG colocados a 2 m de altura, la cual permaneció estática sobre un suelo desnudo durante las evaluaciones, encontrando una reducción de pérdidas de noche respecto al día del 62%, cifra que es intermedia a las encontradas en este trabajo para los EPG 1 y EPG 2,5; lo cual es lógico si se considera que la altura de ubicación de los emisores, también, es casi intermedia a las empleadas en este experimento.

Para relacionar las PEA con el tamaño de gotas, en la Tabla 5, se presenta el diámetro de gotas para los EPG y EPF, medido en condición sin viento. En la misma, puede observarse que en ambos tipos de emisores se generan tamaños de gotas crecientes con la distancia y con el diámetro de boquilla. La distribución de gotas es más uniforme con los EPF que con los EPG ya que los valores de RD, están más próximos a uno. Puesto que el EPF produce una mayor proporción de gotas pequeñas (menor de 1,5mm), esto puede ayudar a explicar las mayores PEA que se obtienen con este emisor respecto al EPG, ya que estas gotas pequeñas son más sensibles a la evaporación y arrastre por el viento (Edling, 1985). No se han encontrado diferencias signi-

ficativas en las PEA entre los emisores LEN® y D3000®, aunque, como se muestra en la Tabla 5, hay pequeñas diferencias en la distribución de tamaños de gota.

No se encontró ninguna correlación entre la dirección del viento y la uniformidad de aplicación del agua o las PEA cuando la dirección del viento fue constante. No obstante, el efecto es difícil de cuantificar con precisión debido a la aleatoriedad de los cambios de dirección durante el ensayo.

Para determinar los modelos de predicción de las PEA se aplicó la metodología Stepwise de regresión múltiple, tomando como posibles variables climáticas explicativas la velocidad del viento, la humedad relativa y la temperatura. Los riegos se agruparon de acuerdo a: 1) su momento de aplicación (nocturnos y diurnos); 2) tipo de emisor utilizado; y 3) altura sobre el suelo. Los modelos que mejor explican las PEA se muestran en la Tabla 6. En el caso de riegos nocturnos, solo la velocidad del viento fue seleccionada como variable explicativa. El término independiente y el coeficiente de regresión fueron estadísticamente significativos ($p < 0.001$) en los cuatro modelos. Aunque los coeficientes de determinación de los cuatro modelos no son muy altos (R^2 entre 23 y 25%), la relación entre las variables del modelo es estadísticamente significativa ($p < 0.001$). En el caso de riegos diurnos, también fue la velocidad del viento la única variable explicativa seleccionada, y los coeficientes de regresión fueron estadísticamente significativos. En este caso, el término independiente ni fue estadísticamente significativo. Además, aunque los coeficientes de determinación resultaron mayores (R^2 entre 25 y 50%), la relación entre las variables del modelo tiene un menor nivel de significación ($p < 0.05$ y $p < 0.001$, dependiendo del modelo).

Los modelos obtenidos considerando todos los riegos proporcionaron una mejor predicción de las PEA que considerando los riegos diurnos y nocturnos separadamente (Tabla 6). El nivel de explicación de las PEA con la velocidad del viento fue ahora mayor (R^2 entre 48 y 58%), siendo la relación entre las variables del modelo estadísticamente significativa ($p < 0.001$). Puesto que se realizaron más evaluaciones durante la noche que durante el día, las ecuaciones pueden estar sesgadas hacia la situación de riegos nocturnos.

Tabla 4. Reducción de las pérdidas por evaporación y arrastre (pea, %) alcanzadas en los riegos nocturnos respecto a los riegos diurnos.

		Riego nocturno			
		EPF 2,5	EPF 1,0	EPG 2,5	EPG 1,0
Riego diurno	EPF 2,5	41,4	65,6	53,7	75,6
	EPF 1,0	12,7	48,7	31,0	63,7
	EPG 2,5	35,8	62,3	49,3	73,3
	EPG 1,0	2,0	42,5	22,6	59,3

pea = pérdidas por evaporación y arrastre; epf 2,5 = emisor de plato fijo a 2,5 m de altura; epf 1,0 = emisor de plato fijo a 1 m de altura; epg 2,5 = emisor de plato giratorio a 2,5 m de altura; epg 1,0 = emisor de plato giratorio a 1 m de altura.

Tabla 5. Diámetro de gotas producidas por los emisores de plato giratorio (EPG) y fijo (EPF).

Db (mm)	EPG					
	4.96			7.98		
De (m)	2,4	5,4	7,8	2,4	5,4	8,4
Dm (mm)	0,85	1,52	2,01	1,01	1,36	1,17
DNM (mm)	0,74	1,51	1,16	0,88	1,05	0,75
DVM (mm)	0,84	1,93	4,28	1,03	2,34	4,31
Rd	0,88	0,79	0,27	0,85	0,45	0,17
Db (mm)	EPF					
	D3000			LEN		
De (m)	3,0	5,4	3,0	6,0	4,2	4,2
Dm (mm)	1,02	1,63	1,50	1,95	2,02	1,99
DNM (mm)	0,93	1,63	1,41	2,01	1,89	1,90
DVM (mm)	1,00	1,81	1,53	2,24	2,09	2,19
Rd	0,93	0,93	0,92	0,90	0,90	0,88

db= diámetro de boquilla; de= distancia desde el emisor; dm= diámetro medio de gota; dnm= diámetro numérico medio; dvm= diámetro volumétrico medio; rd= cociente entre dnm y dvm.

En los emisores colocados a 1m, el modelo explicativo de las PEA incorporó también las variables temperatura y humedad relativa para los EPF y EPG. Sin embargo, su aporte al R2 era solo de unas 3 unidades, por lo que se prefirió tomar el modelo solo con la velocidad de viento y, así, conservar la misma estructura en todas las situaciones estudiadas.

Aparte de los ajustes anteriores, también, se realizó un ajuste de las PEA sin discriminar el tipo de emisor, considerando únicamente la altura

de instalación, resultando, en todos los casos, el viento como única variable explicativa de los modelos (Tabla 7). Estos modelos, en general, no mejoran en relación con los modelos antes expuestos (Tabla 6), sin embargo su uso reduce el número de ecuaciones necesarias.

Como comentario a los modelos de predicción de las PEA, se puede decir que la velocidad del viento fue la variable más explicativa de dichas pérdidas; sin embargo, queda una variabilidad importante sin explicar, lo que evidencia que

Tabla 6. Modelos predictivos de las PEA para riegos diurnos, nocturnos y ambos conjuntamente.

Riegos	Tratamiento	PEA	R2 (%)	SE
Nocturnos	EPF 2.5	5.46*** + 1.90***W	23	2.78
	EPF 1	2.88*** + 1.36***W	24	1.99
	EPG 2.5	4.27*** + 1.54***W	25	2.15
	EPG 1	2.09*** + 0.92***W	26	1.28
Diurnos	EPF 2.5	4.48ns + 2.63*W	30	4.57
	EPF 1	2.83ns + 1.82*W	26	3.52
	EPG 2.5	-0.26ns + 3.66**W	50	4.19
	EPG 1	-0.38ns + 2.46**W	41	3.37
Nocturnos y diurnos	EPF 2.5	4.90*** + 2.40***W	48	3.31
	EPF 1	2.38*** + 1.83***W	50	2.45
	EPG 2.5	2.94*** + 2.62***W	58	2.94
	EPG 1	0.95* + 1.91***W	58	2.15

PEA = pérdidas por evaporación y arrastre; R2 = coeficiente de determinación; SE = error estándar de la estimación; EPF 2,5 = emisor de plato fijo a 2,5m de altura; EPF 1 = emisor de plato fijo a 1m de altura; EPG 2,5 = emisor de plato giratorio a 2,5m de altura; EPG 1 = emisor de plato giratorio a 1m de altura; W = velocidad del viento (m s-1); * = p<0,05; ** = p<0,01; *** = p<0,001; ns = no significativo.

Tabla 7. Modelos predictivos de las pérdidas por evaporación y arrastre (peA) para riegos nocturnos, diurnos y ambos nocturnos y diurnos, para dos alturas del emisor.

Riegos	Altura de emisor	PEA	R2 (%)	SE
Nocturnos	1 m	2.48*** + 1.14***W	20	1.81
	2.5 m	4.86*** + 1.72***W	22	2.61
Diurnos	1 m	1.23ns + 2.14*W	32	3.39
	2.5 m	2.11ns + 3.15*W	39	4.32
Nocturnos y diurnos	1 m	1.67*** + 1.87***W	52	2.38
	2.5 m	3.92*** + 2.51***W	52	3.21

PEA = pérdidas por evaporación y arrastre; R2 = coeficiente de determinación; SE = error estándar de la estimación; W = velocidad del viento (m s⁻¹); * = p < 0,05; ** = p < 0,01; *** = p < 0,001; ns = no significativo.

existen otros factores que también influyen sobre el proceso de evaporación y arrastre, como podrían ser los cambios de la dirección y velocidad del viento durante el ensayo, la propia imprecisión del método de medida, o la distribución de tamaños de gota producida por cada tipo de emisor.

En un riego en particular, se pudo observar que la dirección del viento se invirtió justo en el momento en que el equipo pivote pasaba por la línea de pluviómetros, causando grandes diferencias entre lo descargado y lo recogido por los pluviómetros, con valores comprendidos entre 16 y 56% para los EPG 1 y EPF 2,5, respectivamente. Aunque estas fueron las mayores pérdidas registradas en los tres años de ensayo, las mismas no se correspondieron con la mayor velocidad del viento ocurrida en todas las evaluaciones. Al tratarse de una situación excepcional, este riego no se consideró en los cálculos de las PEA. Dechmi (2002) indica que rachas fuertes de viento en períodos cortos pueden inducir a pérdidas por evaporación y arrastre que no son explicadas por la velocidad promedio del viento.

En un experimento con un lateral de riego equipado con emisores *Rotator* colocados a 2m de altura, Playan et al. (2005), concluyen que la velocidad del viento fue la variable que mejor explica las PEA en los riegos diurnos y en ambas condiciones en conjunto (riegos diurnos y nocturnos), pero, al contrario que en este trabajo, no encontraron esta relación cuando solo se consideraban los riegos nocturnos. En el mismo estudio, estos autores obtuvieron valores de R2 para el emisor tipo *Rotator* situado a 2m sobre el suelo de 28, 38 y 60% en los riegos nocturnos, diurnos y en ambas condiciones (diurnos y noc-

turnos) respectivamente. Estas cifras son parecidas a las obtenidas en este trabajo para los EPG.

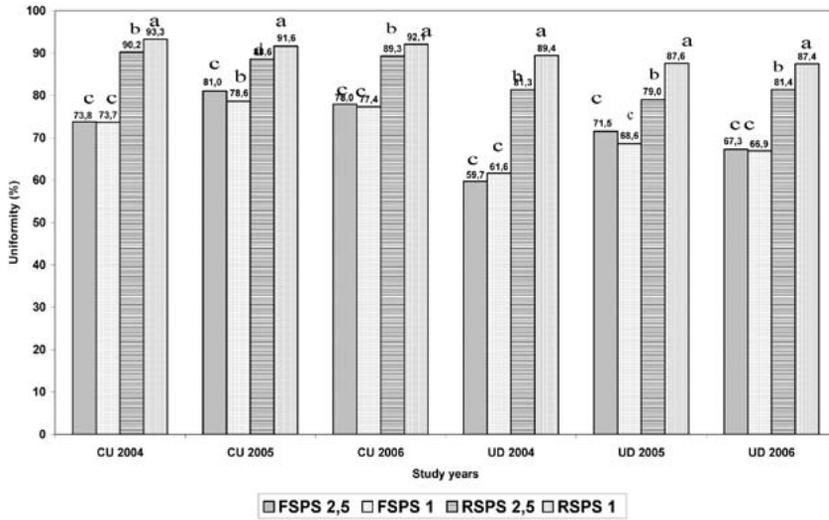
Uniformidad del agua aplicada en los riegos individuales

En la Figura 2, se presentan los valores medios de CU y DU correspondientes a los 60 riegos individuales evaluados en las tres campañas de experimentación. En ella, se observa que los mayores valores se consiguen con los EPG, siendo significativamente mayores los valores correspondientes a los aspersores situados a 1m de altura sobre el suelo que a 2,5m. Este resultado contrasta con el hecho de que la mayor parte de los aspersores aumentan la uniformidad de distribución del agua al aumentar la altura (Tarjuelo 1999). También se obtuvieron diferencias significativas entre los EPF y los EPG, pero no entre los EPF a las dos alturas, excepto en el año 2005, donde se obtuvo una mayor uniformidad con el aspersor EPF 2,5 m. Puesto que, como después se verá, los bajos valores de CU y DU correspondientes a EPF no se corresponden con los altos valores de uniformidad del agua en el suelo y de la producción final del cultivo, parece razonable pensar que el tamaño de los pluviómetros utilizados (de 16cm de diámetro de recogida) puede resultar pequeño para muestrear el reparto de agua con los EPF.

Las diferencias entre los valores de CU y DU ponen de manifiesto que ambos parámetros ofrecen una información complementaria, siendo más sensible a la variabilidad la DU.

Para comparar los EPF (LEN® en la primera campaña y D3000® en las dos campañas siguientes) se realizó un análisis estadístico entre ellos, re-

Figura 2: Valores medios de cu y du de los riegos individuales para las cuatro combinaciones aspersor-altura ensayadas.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

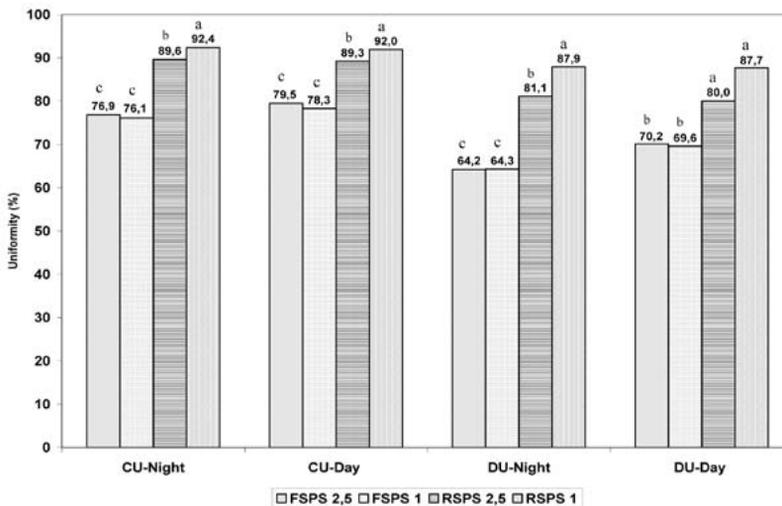
sultando significativamente mayores los valores de CU y DU obtenidos con el D3000® que con el LEN®, tanto para los aspersores situados a la altura de 1 m como a 2,5 m. Una posible explicación puede estar en que los D3000® emiten los pequeños chorros de agua con dos ángulos de salida, mientras que los aspersores LEN solo tienen un ángulo de salida, con una sola distancia de alcance, lo que puede disminuir la probabilidad de que el agua caiga dentro de los pluviómetros. No

obstante, como después se verá, estas diferencias no se mantienen en la uniformidad del agua en el suelo ni en la producción final del cultivo

No se encontraron diferencias significativas en los valores de CU y DU por efecto de las dos separaciones entre aspersores (3.2 y 4.8m) utilizados en las diferentes campañas de riego con el EPG 2.5.

En la Figura 3 se muestran los valores de CU y DU medios para los riegos diurnos y nocturnos

Figura 3: Valores medios de CU y DU en riego diurno y nocturno para las cuatro combinaciones aspersor-altura.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

nos, en las cuatro combinaciones emisor-altura ensayadas durante los tres años de estudio. La principal novedad de estos resultados respecto a los de la Figura 2 es el mejor comportamiento de los EPF en riegos diurnos que en nocturnos, siendo mayores las diferencias en los valores de DU, al tener este parámetro mayor nivel de discriminación. Puesto que la velocidad del viento fue mayor en los riegos diurnos (3,5m/s de media, frente a 1,3m/s en los nocturnos), se pone de manifiesto el efecto positivo del viento en este tipo de aspersores, al menos para las velocidades de viento muestreadas (0,2-4,9m s-1).

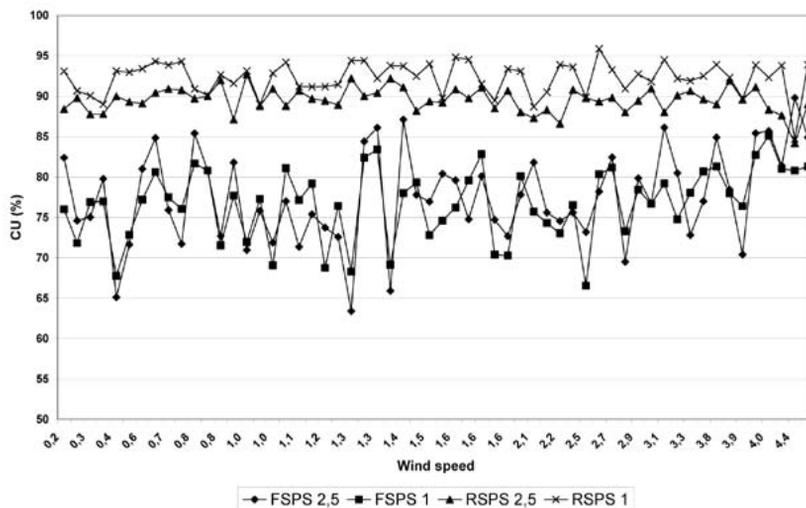
Cuando la dirección del viento es constante, no se encontró ninguna relación entre esta y CU o DU. No obstante, pequeños cambios en la dirección del viento durante la evaluación aumentan, en general, los valores de CU y DU, sobre todo en los EPF. No obstante, este efecto es difícil de cuantificar con precisión dada la aleatoriedad con que se suelen producir esos cambios de dirección durante los ensayos de evaluación. Aunque la dirección del viento puede tener un efecto significativo en el borde externo del área regada por el equipo pivote, sobre todo cuando sople en la misma dirección del lateral de la máquina, lo que puede incrementar o disminuir significativamente el área regada, este efecto no ha sido objeto de estudio en este trabajo.

Comparando los valores de CU de los riegos diurnos y nocturnos para el mismo tipo de emi-

sor, sólo se encontraron diferencia significativas entre el EPF 2,5 diurno respecto al EPF 1 nocturno, siendo superior en el primero. En los EPG solo hubo diferencia significativas entre valores de CU entre los EPG 1 y EPG 2.5, independientemente de que los riegos fueran diurnos y nocturno. Esto pone de manifiesto el efecto positivo del viento en la uniformidad de riego con los EPF, y el escaso efecto del viento sobre el EPG.

En la Figura 4 se muestra la relación entre CU y la velocidad del viento (W) para las distintas combinaciones emisor-altura durante los tres años ensayo. En ella se pone de manifiesto la gran diferencia de uniformidad de riego entre los dos tipos de aspersores. La gran variabilidad encontrada en los valores de CU con los EPF pone también de manifiesto otra de las novedades de este trabajo como es que el tamaño de los pluviómetros utilizados puede resultar pequeño para muestrear el reparto de agua con este tipo de aspersores. Esta gran variabilidad de valores de CU obtenidos con los EPF impide poner de manifiesto con claridad el crecimiento de este parámetro con la velocidad del viento, aunque se puede apreciar esa tendencia. El comportamiento de la UD fue similar al CU, aunque con valores más bajos para todas las combinaciones emisor-altura. Los mayores valores de CU se consiguen con los EPG, con valores entre 90-95% para la altura de 1m, y alrededor de 90% para la altura de 2,5m. Con los EPF los valores de CU no superar el 80-85%.

Figura 4: Relación entre CU y velocidad del viento en las cuatro combinaciones aspersor-altura.



epf = fsp: Emisor de plato fijo; epg = rsp: Emisor de plato giratorio

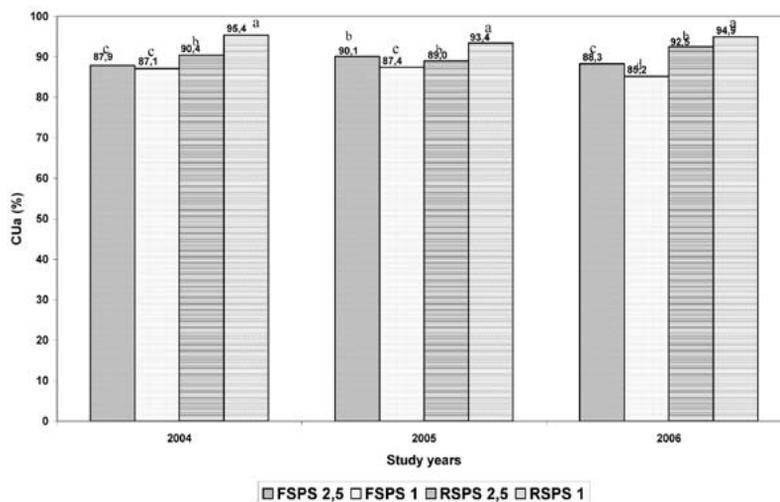
Uniformidad del agua aplicada en los riegos acumulados

En las Figuras 5 y 6 se muestran los valores medios de CU y UD acumulados (CUa, y UDa) para los tres años de ensayo. Comparando estos resultados con los de la Figura 2 se aprecia una notable mejoría en relación con los riegos individuales (Figura 2), sobre todo en los EPF. Los resultados ponen de manifiesto los mayores valores de uniformidad del EPG 1, con diferencias significativas respecto a los demás.

También se pone de manifiesto un pequeño problema en la carta de aspersores en el tratamiento EPG 2,5 durante el segundo año de ensayo, que se solucionó en la siguiente campaña. Las Figuras 5 y 6 también ponen de manifiesto que los menores valores medios de CU y UD obtenidos con los EPF tipo LEN[®] respecto a los D3000[®] (Figura 2) desaparecen en los riegos acumulados.

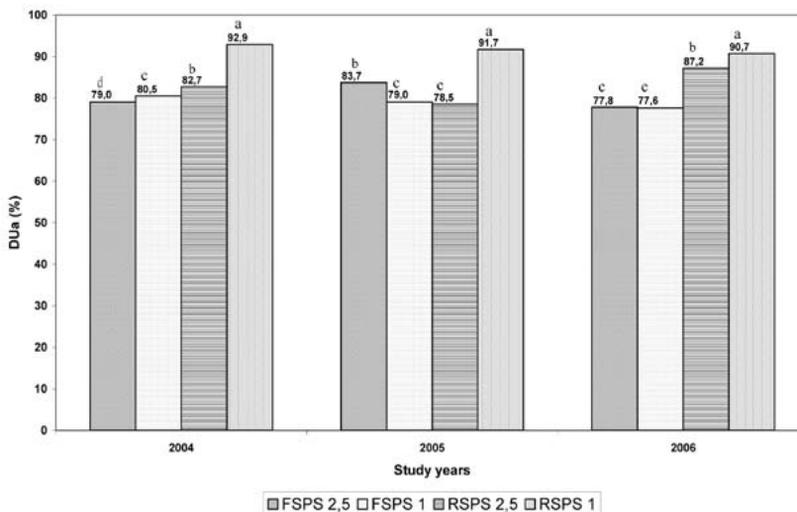
Para ilustrar el comportamiento de los riegos individuales y acumulados, en la Figura 7 se muestra, a modo de ejemplo, la evolución de

Figura 5: Valores de CUa medios correspondientes a los riegos acumulados para las cuatro combinaciones emisor-altura ensayadas.



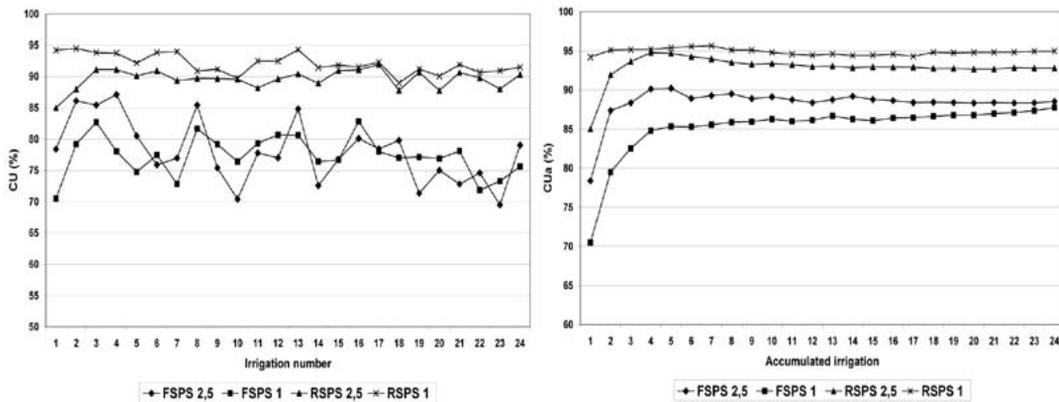
EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

Figura 6: Valores de DUa medios correspondientes a los riegos acumulados para las cuatro combinaciones aspersor-altura ensayadas.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

Figura 7: Evolución del CU en los riegos individuales (CU) y acumulados (CUA) durante el último año de ensayo en las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

CU y CUA en las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas para el último año de estudio. En la misma se observa una notable mejoría al acumular los riegos, sobre todo en los EPF, donde desaparece la variabilidad obtenida en los valores de CU. El mismo efecto se encontró en el parámetro DU, solo que con menores valores en todos los tratamientos.

Uniformidad del agua en el suelo

A título de ejemplo, en la Figura 8, se presenta, para las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas, una comparación de los valores de CU obtenidos en los riegos individuales durante el último año de ensayo y la evolución del CU correspondiente a la humedad en el suelo después del riego (CUSd), una vez que ha cesado la redistribución del agua en el suelo. Para mayor claridad, se han seleccionado los valores correspondientes a las profundidades de 0 a 35 cm (promedio de las lecturas de los sensores a 10, 20 y 30 cm), zona que coincide con la de mayor actividad radicular en este cultivo. Semejante nivel de uniformidad del agua en el suelo se encontró en la zona más profunda. Los valores de uniformidad antes del riego (CUSA) son muy parecidos, y normalmente algo inferiores.

En las dos zonas correspondientes a los EPF cabe destacar que los valores de CUSd (en la capa de 0-35 cm) siempre fueron superiores a los de CU, resultando casi constantes a lo largo del tiempo, a pesar de las fluctuaciones de CU en los diferen-

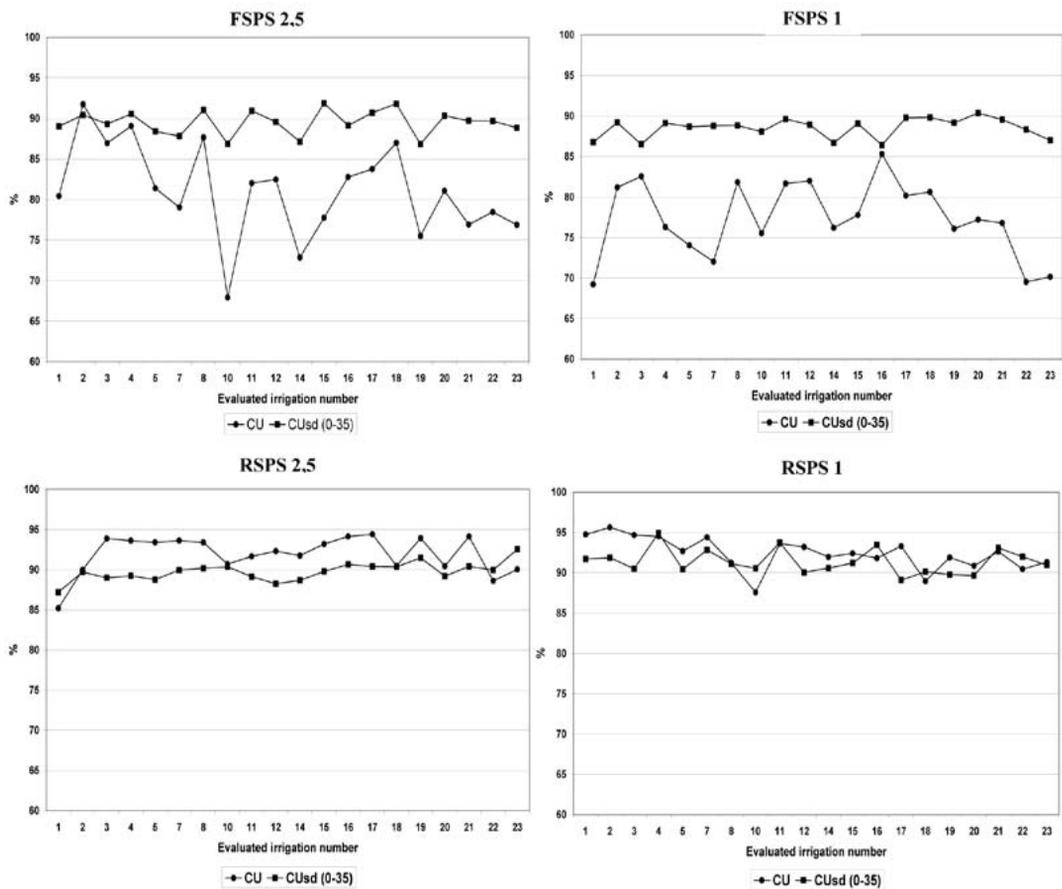
tes riegos. Este hecho, junto con los buenos resultados obtenidos en la producción del cultivo, como después se verá, pone de manifiesto que la estimación de la uniformidad del agua aplicada con el riego utilizando pluviómetros de 16 cm de diámetro en los EPF puede no ser muy precisa, dada la forma en que estos aspersores realizan la aplicación del agua. En los EPG, lo valores de CU y de CUSd en la capa 0-35 cm son muy parecidos, lo cual es lógico al tratarse de valores de CU muy altos.

La uniformidad de distribución antes (UDSA) y después (UDSD) del riego, muestra una tendencia semejante a la de CUS, aunque con valores más bajos.

Un resumen de los valores medios de CU y UD durante el segundo y tercer años de ensayo, así como de CUSd y UDSD en la capa de 0-35 cm, para las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas, con sus respectivos coeficientes de variación, se muestran en la Tabla 8. Es preciso recordar que los valores de uniformidad en superficie y en el perfil del suelo corresponden a los mismos puntos del terreno, destacando la menor variabilidad del agua en el suelo respecto al agua aplicada en superficie.

El comportamiento de la uniformidad del agua en el suelo en el intervalo de 0-35 cm resultó semejante en los dos años de ensayo. Cabe destacar que en la zona correspondiente al EPG 1 es donde se alcanzan los mayores valores de

Figura 8: Coeficiente de uniformidad de aplicación del agua (CU) y de la humedad en el suelo después del riego (CU_{sd}) a la profundidad de 0-35cm para las cuatro combinaciones emisor-altura estudiadas durante el último año de ensayo.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

uniformidad en el suelo, existiendo diferencias significativas con el resto ($p < 0,001$). Por el contrario, en la zona correspondiente al EPF 1 es donde el agua en el suelo tiene menor uniformidad, aunque, como se verá al analizar los datos de producción final del cultivo, esta menor uniformidad del agua en el suelo no ha tenido repercusión en la producción del cultivo.

Son muchos los trabajos publicados que relacionan la uniformidad de aplicación del agua en sistemas de riego por aspersión estacionario con la uniformidad del agua en el suelo (Stern y Bresler (1983), Li and Kawano (1996), Li (1998), Li y Rao (2000), Dechmi (2002), Martínez (2004), de Juan et al. 2008), sin embargo, no se han encontrado referencias que utilicen equipos pivote como en este trabajo. En la gran mayoría de los trabajos antes citados se indica un aumento de la unifor-

midad del agua en el suelo respecto a la uniformidad del agua aplicada con el sistema de riego, confirmando lo obtenido en este trabajo.

La gran diferencia entre los valores de uniformidad del agua aplicada con los EPF respecto a la uniformidad del agua en el suelo, ratifica la hipótesis de que una buena parte de la variabilidad del agua aplicada con el riego puede ser causada por insuficiente tamaño de los pluviómetros que indican las normas de ensayo ANSI/ASABE S436.1 (ASABE, 2001) e ISO-11545 (ISO, 2001), actualmente en revisión cuando se tiene que realizar la evaluación de este tipo de aspersores. Pruebas realizadas en trabajos posteriores con pluviómetros de mayor tamaño (o utilizando grupos de tres pluviómetros como estos colocados uno al lado del otro), ratifican esta hipótesis (resultados aún no publicados).

Tabla 8: Valores medio (M, %) y coeficiente de variación (CV, %) de la uniformidad de aplicación del agua (CUy UD) y del contenido de agua en el suelo después del riego en el estrato 0-35 cm (CUsd y UDsd).

Tipo y altura del emisor	Segundo año de ensayo							
	CU		CUsd		DU		DUsd	
	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)
EPF 2,5	81,0	5,0	90,3b	1,0	71,5	7,9	85,6b	1,7
EPF 1	78,6	6,4	88,1c	1,1	68,6	9,7	81,2c	2,5
EPG 2,5	88,6	1,5	90,4b	1,3	79,0		86,0b	1,9
EPG 1	91,6	4,4	92,1a	0,7	87,6	5,6	87,6a	1,3

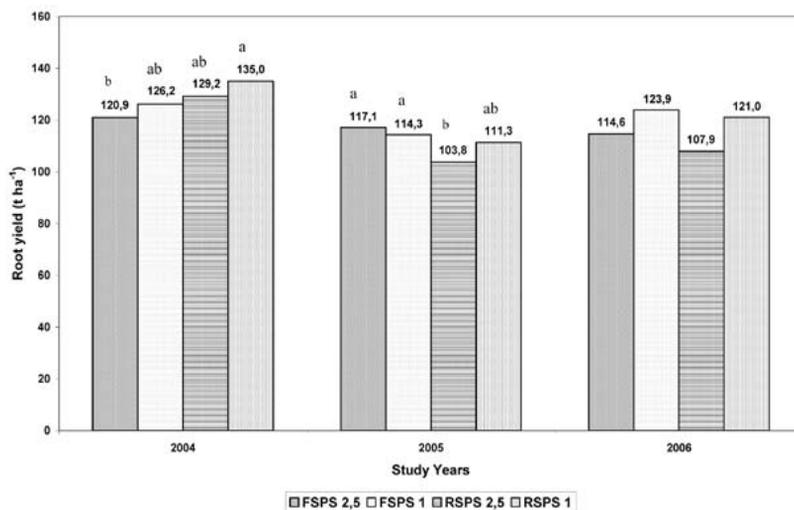
Tipo y altura del emisor	Tercer año de ensayo							
	CU		CUsd		DU		DUsd	
	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)	M (%)	CV (%)
EPF 2,5	78,0	7,1	89,5b	1,7	67,3	10,5	84,4a	2,8
EPF 1	77,4	6,0	88,5c	1,4	66,9	10,0	80,2b	2,5
EPG 2,5	89,3	2,6	89,8b	1,3	81,4	3,0	85,1a	2,3
EPG 1	92,1	2,2	91,4a	1,7	87,4	4,0	85,9a	3,9

Uniformidad en la producción final del cultivo

Los resultados obtenidos (Figura 9) ponen de manifiesto que la producción final del cultivo depende más del agua total aplicada (Tabla 2) que de la uniformidad con que se ha aplicado con las distintas combinaciones emisor-altura ensayadas (Tabla 8), dado el alto nivel de uniformidad del agua en el suelo que se consigue en todos los casos. Estas diferencias de agua

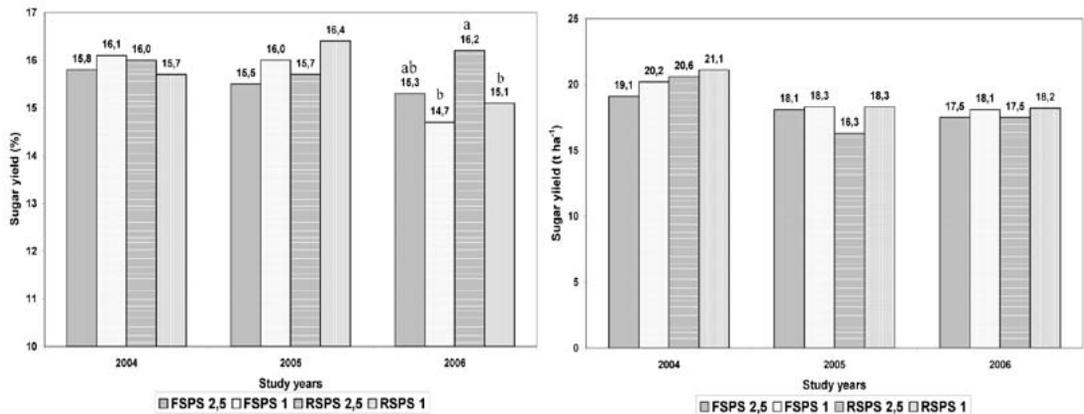
aplicada a los distintos tratamientos fueron inevitables al tratarse de un ensayo realizado con un equipo pivot en condiciones reales de campo, no habiendo podido ajustar mejor la carta de aspersores de la máquina. Los resultados de producción obtenidos en 2005 han estado además condicionados por la peor calidad del suelo en la zona correspondiente a los tratamientos con EPG 2,5 y EPG 1.

Figura 9: Rendimiento de raíz para las diferentes combinaciones emisor-altura.



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

Figura 10: Producción de azúcar para las diferentes combinaciones emisor-altura. En riqueza en azúcar (%) a la izquierda y en producción total (t ha⁻¹) a la derecha



EPF = FSPS: Emisor de plato fijo; EPG = RSPS: Emisor de plato giratorio

Los resultados obtenidos parecen muy interesantes desde un punto de vista económico ya que ponen de manifiesto que puede ser suficiente regar con los EPF, que son más baratos que los EPG, y de mayor durabilidad al no tener ningún elemento giratorio, aunque apliquen el agua con menos uniformidad. Este trabajo, y otros realizados con sistemas de aspersión estacionarios en cultivos de maíz (Martínez 2004 y de Juan et al. 2008) y cebolla (Jiménez 2008 y Jiménez et al. 2009, en publicación), ponen de manifiesto que conseguir un CU \approx 80% en riegos individuales, puede ser suficiente para alcanzar una buena uniformidad de producción, ya que el correspondiente CUS puede superar fácilmente el 90%.

La producción de azúcar (Figura 10) sigue la misma tendencia que la producción de raíz, aunque no hubo diferencias significativas entre las distintas combinaciones emisor-altura en ninguno de los tres años de estudios. En cuanto a la riqueza en azúcar, se aprecia una mayor proporción de azúcar en los tratamientos en que se aplicó menos agua de riego, aunque solo hubo diferencias significativa ($p < 0,05$) en el año 2006 entre el tratamiento que menos agua recibió (EPG 2.5) y el resto (Figura 9). La falta de diferencias significativas en el primer y segundo año de ensayo puede estar en parte relacionada con la lluvia de 18 mm caída dos semanas antes de la recolección, a pesar de que se dejó de regar tres semanas antes de la recolección. Por el contrario, en el último año de ensayo no hubo

lluvia después de dejar de regar, diez días antes de la recolección.

5.5. Conclusiones

Los emisores de plato giratorio (EPG, Rotator®) utilizados en riego con equipos pivote consiguen mayor uniformidad de aplicación de agua (CU de 90-95%) que los emisores de plato fijo (EPF, LEN® or D3000®) (CU de 80-85%), siendo además poco afectados por el viento.

La uniformidad de los riegos acumulados aumenta de forma significativa respecto a los riegos individuales en los EPF, pero no en los EPG, siendo ésta del mismo orden de magnitud que la uniformidad del agua en el suelo.

Un tamaño de los pluviómetros de 16cm de diámetro parece insuficiente para evaluar el riego con equipos pivote utilizando EPF dada la gran variabilidad de los valores de CU y UD obtenidos, estando además muy distantes de los valores de CUA y DUA de los riegos acumulados y de la uniformidad del agua en el suelo o la uniformidad en la producción del cultivo.

Llama la atención que con los EPG localizados a 1m de altura se hayan obtenido mayores valores de CU y DU que cuando se sitúan a 2,5m, al contrario de lo que suele ocurrir con los demás tipos de aspersores.

El valor de uniformidad correspondiente al conjunto de riegos acumulados con equipos pivote recoge mejor el efecto sobre la producción final del cultivo que los valores correspondientes a riegos individuales. Este efecto es mucho más importante en los EPF, dada la forma que tienen de aplicar el agua.

La producción final del cultivo ha estado más condicionada por la cantidad de agua disponible en el suelo, que por las escasas diferencias de uniformidad de agua en el suelo que se consigue con el riego mediante equipos pivote, siendo los resultados representativos de lo que ocurre en un riego real con este tipo de máquinas.

Una uniformidad de aplicación de agua en riegos individuales con equipos pivote en torno a $CU \approx 80\%$ puede ser suficiente para

alcanzar una buena uniformidad de producción ya que el correspondiente CU s del agua en el suelo puede superar fácilmente el 90%. Valores de $CU > 90\%$ en riego individuales no incrementan de forma significativa la uniformidad del agua en el suelo ni la producción final del cultivo.

Agradecimientos: Los autores quieren expresar su gratitud al Ministerio de Educación y Ciencia (MEC) de España por financiar el proyecto AGL2007-66716-CO3-03. También quieren agradecer a la empresa Aisco Equipment Europe, Ltd. y al Centro de Formación Agroambiental de Albacete, por la ayuda prestada, proporcionando los medios e instalaciones necesarias para poder realizar este trabajo.