

# Distribución del agua bajo riego por aspersión y su efecto sobre el cultivo de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.)

Water distribution under sprinkler irrigation and its effect on black bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop

José Nicolás ORTIZ ROMERO✉, Héctor Alexis MIRANDA y Douglas PEROZA

Departamento de Ingeniería Agrícola, Decanato de Agronomía, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado" (UCLA), Barquisimeto, estado Lara, Venezuela. E-mail: jortiz@ucla.edu.ve

✉ Autor para correspondencia

Recibido: 21/07/2011      Fin de primer arbitraje: 12/01/2012      Primera revisión recibida: 28/02/2012  
Fin de segundo arbitraje: 10/04/2012      Segunda revisión recibida: 16/04/2012      Aceptado: 20/04/2012

## RESUMEN

El riego por aspersión, al igual que los otros métodos de riego, se caracteriza por no aplicar la misma cantidad de agua en todos los puntos de la parcela regada, sino que siempre habrá algún grado de desuniformidad. Con el propósito de estudiar la uniformidad de aplicación del agua en superficie y en el suelo bajo un sistema de riego por aspersión estacionario, así como el efecto sobre el cultivo de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.), se desarrolló una investigación durante los años 2008 y 2009 en el Campo Experimental de Riego del Decanato de Agronomía de la UCLA. Los resultados muestran que la uniformidad de los riegos acumulados medida sobre la cubierta vegetal (CUa) y en el perfil del suelo (CUs) fueron mayores que la uniformidad promedio de los eventos de riegos individuales, y que la uniformidad del rendimiento del cultivo de caraota tiene mayor aproximación al CUs después del riego. La variabilidad del rendimiento, de sus componentes y del índice de cosecha fue ligeramente mayor en el ciclo 2009 que en el 2008, y se debió a la mayor variabilidad de las láminas de riego acumuladas recibidas en cada subparcela de dicho ciclo.

**Palabras clave:** Riego por aspersión, uniformidad de riego, caraota, rendimiento y sus componentes

## ABSTRACT

The sprinkler irrigation alike other irrigation methods, is characterized by the non-uniform application of the amount of water in all points of the irrigated plots, then, there always exist some degree of non-uniformity in the watering process. So, to study the uniformity of water application over the crop canopy and at the soil with an stationary sprinkler irrigation system as well as the effect on a bean (*Phaseolus vulgaris* L.) crop, a field trial was conducted on 2008 and 2009 in the research plots of the UCLA Agronomy Faculty. Results showed that the uniformity of the accumulated irrigation (CUa) measured above the crop canopy and in the soil profile (CUs) was greater than the average uniformity of each individual irrigation events and that the uniformity of the bean yields was closer to the CUs after irrigation. The variability of yield, its components and the harvest index was slightly greater on 2009 than on 2008 due to the larger variability of the accumulated irrigation received by each sub-plot on 2009.

**Key words:** Sprinkler irrigation, irrigation uniformity, black bean, yield and its components

## INTRODUCCIÓN

La uniformidad de aplicación del agua es un criterio de funcionamiento importante para el diseño y manejo de cualquier sistema de riego por aspersión. No obstante, la lámina de agua aplicada por estos sistemas no es completamente uniforme en toda la parcela regada. El principal factor que distorsiona el patrón de distribución del agua en el riego por aspersión es la velocidad y dirección del viento (Tarjuelo, 1999; Dechmi *et al.*, 2004). Dicha distorsión puede llegar a reducir de forma importante

el coeficiente de uniformidad (CU), la uniformidad de distribución (UD), así como la eficiencia de aplicación (Solomon *et al.*, 1996). Faci y Bercero (1991) indican que en los sistemas de aspersión fijos, a partir del valor umbral de velocidad del viento ( $V_v$ ) de  $2,1 \text{ m s}^{-1}$ , se producía un descenso lineal del CU conforme aumentaba la  $V_v$ , mientras que Tarjuelo *et al.* (1992) afirman que la relación CU -  $V_v$  no siempre es lineal, sino que en algunos casos se ajusta mejor a un polinomio de segundo grado. La influencia de la velocidad del viento está relacionada con el tipo de emisor, diámetro de la boquilla, presión de trabajo

y altura de la boquilla respecto a la superficie del suelo (Tarjuelo, 1999). Velocidades de viento mayores de  $2,1 \text{ m s}^{-1}$  resultan en una aplicación desigual de agua, llevando a una aplicación excesiva de agua en algunas zonas y a un estrés hídrico en otras, lo que puede dar lugar a una pérdida relevante del rendimiento. Las diferencias en velocidad y dirección del viento entre los distintos eventos de riego llevan a un proceso de compensación que resulta en un coeficiente de uniformidad acumulado o estacional (CUa) más alto que el coeficiente de uniformidad promedio (CUM) de los eventos de riego individuales (Dechmi, 2002). Anteriormente, Berenguer *et al.* (1997) y Li y Rao (2000) habían encontrado un CUa superior al CUM en sistemas de aspersión estacionario. En la misma línea, Ortiz *et al.* (2010) reportan resultados similares para sistemas de aspersión de movimiento continuo tipo pivote central. El marco de riego es otro aspecto que influye sobre la uniformidad de aplicación de agua (CU y UD), en este sentido, Montero *et al.* (2000) señalan que los marcos cuadrados presentan una mayor uniformidad que los rectangulares cuando se emplean aspersores bien con dos boquillas, bien con una única boquilla con vaina prolongadora.

La distribución del agua en superficie de un sistema de riego por aspersión estacionario ha sido ampliamente investigada, sin embargo, el cultivo responde al agua disponible en su zona de raíces, por consiguiente, la uniformidad del agua en el suelo es más importante que en la superficie del mismo (Li y Kawano, 1996). Experimentos de campo que estudian la relación entre la distribución espacial de la humedad en el suelo y la uniformidad de aplicación de agua en superficie en riego por aspersión estacionario han demostrado que el agua en el suelo es más uniformemente distribuida que la medida en la superficie del suelo (Li, 1998; Li y Rao, 2000). Ortiz *et al.* (2010), en dos campañas de riego, encontraron el mismo resultado para riego por aspersión de tipo pivote central.

Li y Kawano (1996), estudiaron la relación entre la uniformidad de aplicación del agua en superficie (CU) con riego por aspersión y la distribución de la humedad en el suelo (CUs), usando bloques de yeso a 10 cm de profundidad en un suelo desnudo, encontrando que el agua fue mucho más uniformemente distribuida en el suelo que aquella medida en la superficie, con valores en el suelo por encima del 90%, cuando en superficie estuvieron por debajo del 60%.

Dechmi (2002), en un estudio sobre el manejo del agua en el riego por aspersión estacionario en el Valle del Ebro (España), encontró valores de CUs entre 94 y 95% cuando el CU fue de apenas 51%, destacando que sólo en la capa superficial del suelo (0-30 cm) muestra un incremento significativo del contenido de agua a continuación de cada evento de riego y que el CUs en dicha capa fue mayor que el CU.

Los campos regados por aspersión se caracterizan, por lo general, por algún grado de desuniformidad del agua aplicada. Un conocimiento de la influencia de la desuniformidad sobre el rendimiento del cultivo es básico para el diseño, manejo y evaluación económica del sistema de riego (Stern y Bresler, 1983). Las plantas tienden a compensar cierta heterogeneidad de la humedad en la zona radical, por lo que alguna desuniformidad de la distribución del agua en dicha zona puede ser tolerada sin afectar el rendimiento (Letey, 1985).

Or y Hanks (1992) encontraron que la magnitud de variabilidad del rendimiento en el cultivo de maíz fue más pequeña que la magnitud de la variabilidad del agua aplicada. Dogan *et al.* (2002) estudiaron el efecto de la no uniformidad sobre el rendimiento del maíz, concluyendo que el rendimiento del grano no fue afectado por la desuniformidad de aplicación del riego. Li y Rao (2000) informan que, en el caso de un trigo de invierno, la influencia de la uniformidad de riego por aspersión es de baja importancia. Dechmi (2002), en un ensayo de maíz regado con sistema por aspersión estacionario, encontró que el coeficiente de uniformidad del contenido en agua del suelo fue mayor que el coeficiente de uniformidad de la aplicación del agua. Además, estos autores indicaron que si bien la variabilidad de la producción era menor que la encontrada en la distribución del agua de riego (medida sobre la superficie del cultivo), la relación entre ambas era estadísticamente muy significativa. Martínez (2004) indica que la menor variabilidad espacial de distribución del rendimiento de maíz respecto a la del agua aplicada, en riego por aspersión, es debido a que el agua acumulada a lo largo del ciclo muestra mayor uniformidad (CUa=83%) que el promedio de cada aplicación (CU=76%), lo que indica que, las evaluaciones unitarias de riego por aspersión pueden subestimar los valores de uniformidad de aplicación de agua del sistema, a los efectos de cálculo de proyecto y manejo de regadío. Sin embargo, Jiménez *et al.* (2010) encontró

que el rendimiento de cebolla fue más uniforme cuando la uniformidad de aplicación del riego también lo fue.

El objetivo fue estudiar la uniformidad de aplicación del agua en superficie y en el perfil del suelo bajo un sistema de riego por aspersión estacionario, así como el efecto sobre el cultivo de caraota.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Características de la zona y de la parcela experimental

El ensayo se llevó a cabo durante los años 2008 y 2009 en el Campo Experimental de Riego del Decanato de Agronomía de la UCLA en el núcleo Tarabana, Cabudare, estado Lara, ubicado geográficamente a 10°01'52" de latitud norte y 69°16'44" de longitud oeste, y una altitud de 510 msnm. Los datos climáticos medios anuales de la zona son: temperatura de 25°C, precipitación de 813 mm, humedad relativa de 75%, radiación solar de 371 cal/cm<sup>2</sup> y una evaporación de 2085 mm. El suelo es franco (49% de arena, 30% de limo y 21% de arcilla) con una densidad aparente de 1,5 g cm<sup>-3</sup> y una capacidad de campo de 0,30 cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>, pH de 7,5, conductividad eléctrica de 0,18 dS m<sup>-1</sup> y una infiltración básica de 2,16 cm h<sup>-1</sup>.

### Siembra y labores en el cultivo

La siembra del cultivo (*Phaseolus vulgaris* L., var. Tacarigua) se realizó el 08 de agosto en el año 2008 y el 06 de marzo en el año 2009, la misma se hizo con una sembradora de precisión de 4 tolvas acoplada al tractor, a una distancia entre plantas de 9,3 cm, y una distancia entre hileras de 75 cm. En ambos ciclos la cosecha se realizó a los 85 días después de la siembra. La fertilización se realizó en dos partes, la primera en el momento de la siembra, en ésta se aplicó todo el fósforo (100 Kg ha<sup>-1</sup> de fosfato monoamónico) y la mitad del nitrógeno (50 Kg ha<sup>-1</sup> de urea), mientras que la otra mitad se aplicó a los 28 días después de la siembra (previo al inicio de floración). Cabe destacar que no se aplicó potasio, ya que el análisis de suelo reportó un alto contenido de este mineral. El control de malezas fue en un principio manual, pero cuando estas se intensificaron fue necesaria la aplicación de herbicidas, usándose "FLEX" (Fomesafen) para control de hoja ancha y "H1SUPER" (Fluazifop – Butil) para controlar las

gramíneas. Para el control de insectos plaga se hizo aplicaciones de productos químicos de tipo órgano-fosforados, específicamente Difos (Dimetoato). Se realizaron 2 aplicaciones a razón de 1 litro por hectárea tanto para los herbicidas como para el insecticida.

### Control del agua aplicada

Para el riego se utilizó un sistema de aspersión fijo temporal, formado por una subunidad de riego que constaba de una tubería principal y 4 tuberías laterales separadas 10 m con cuatro aspersores en cada línea lateral. Los aspersores se colocaron a una distancia entre ellos de 10 m, y a una altura de 1 m sobre el suelo. Del área total del ensayo (40 m x 40 m), se seleccionó el área delimitada por los 4 aspersores centrales (100 m<sup>2</sup>) que se dividió en 25 sub-parcelas de 2 m x 2 m y en el centro de cada una se colocó un pluviómetro (de 10 cm de diámetro por 15 cm de alto). La Figura 1 presenta la disposición de los 25 pluviómetros en el área de ensayo. Con los datos de las lecturas de los pluviómetros se determinaron el coeficiente de uniformidad (CU) (Christiansen, 1942) y la uniformidad de distribución (UD) (Merriam y Keller, 1978) de los riegos individuales (Ecuaciones 1 y 2, respectivamente).

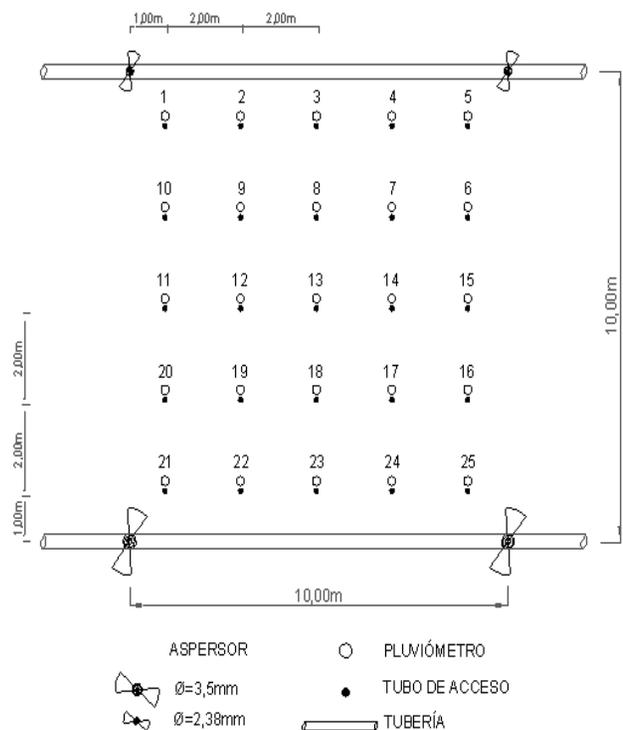


Figura 1. Distribución de los pluviómetros y tubos de acceso en el área control.

Aunque los pluviómetros utilizados no tienen la medida estándar recomendada para medir el volumen de agua captada, Playan *et al.* (2005) evaluando el efecto del tamaño del pluviómetro (pluviómetros de 7,9 cm, 13 cm y 24 cm de diámetro) en la determinación de las pérdidas por evaporación y arrastre, encontraron que para valores de vientos moderados, inferiores  $3 \text{ m s}^{-1}$ , las diferencias no resultaban importantes. También se calculó el CU y la UD de los riegos acumulados (CUa y UDa) con las ecuaciones antes citadas, pero considerando la suma de los volúmenes de riego recogidos en cada uno de los pluviómetros en los sucesivos riegos evaluados. El número de riegos evaluados fue de 13 en el ciclo 2008 y de 9 en el 2009.

$$CU = \left(1 - \frac{\sum |v_i - v_m|}{v_m * N}\right) * 100 \quad (1)$$

Donde,

CU = coeficiente de uniformidad del agua aplicada (%)

$V_i$  = volumen de agua recogida por cada pluviómetro

$V_m$  = volumen medio de agua recogida en el total de los pluviómetros

$n$  = número total de pluviómetros que intervienen en la evaluación

$$UD = \frac{V_{25}}{V_m} * 100 \quad (2)$$

dónde:

UD = uniformidad de distribución del agua aplicada (%)

$V_{25}$  = volumen medio recogido en el 25% de pluviómetros que menos agua recogen

$V_m$  = volumen medio recogido en el total de pluviómetros.

Muy próximo a cada pluviómetro se instaló un tubo de PVC de 50 mm de diámetro y 90 cm de longitud hasta una profundidad de 80 cm (Fig. 1), con el fin de medir el contenido volumétrico de humedad, inmediatamente antes de regar y 2 días después del riego. Las medidas se realizaban cada 10 cm hasta 80 cm en el perfil del suelo con un equipo portátil de medición de humedad marca DIVINER 2000®. Los datos de humedad volumétrica del suelo se utilizaron para calcular el CU y la UD de la humedad del suelo antes (CU<sub>a</sub> y UD<sub>a</sub>) y después (CU<sub>d</sub> y UD<sub>d</sub>) de cada riego. Para el cálculo se usaron las ecuaciones (3) y (4), considerando la humedad promedio en el perfil del suelo hasta 80 cm de profundidad. Tanto

antes como después del riego se hicieron 7 mediciones en el año 2008 y 5 mediciones en el año 2009.

$$CU_s = \left(1 - \frac{\sum |\theta_i - \theta_m|}{\theta_m * n}\right) * 100 \quad (3)$$

Donde:

CU<sub>s</sub> = coeficiente de uniformidad del contenido de agua en el suelo

$\theta_i$  = contenido volumétrico de agua promedio en el perfil suelo correspondiente a un tubo de acceso  $i$

$\theta_m$  = contenido volumétrico de agua promedio en el perfil suelo correspondiente a  $n = 25$  tubo de acceso.

$$UD_s = \frac{\theta_{25}}{\theta_m} * 100 \quad (4)$$

Donde:

UD<sub>s</sub> = uniformidad de distribución del contenido de agua en el suelo

$\theta_{25}$  = promedio del 25% de valores del contenido de agua en el perfil suelo más bajo de los 25 tubo de acceso medidos.

Es de resaltar, que en el ciclo del año 2009, con el fin de crear desuniformidad, en el área control (centro de la parcela) se colocaron dos aspersores modelo Raiman® de una boquilla de 3,5 mm de diámetro, el resto de aspersores eran modelo Rain Bird 14J® provistos de una boquilla de 2,38 mm de diámetro (Fig.1), operando a una presión de 40 PSI. En la temporada 2008 todos los aspersores fueron Rain Bird 14J®.

Los riegos se aplicaron con una frecuencia semanal luego de la germinación, emergencia y arraigo del cultivo. La evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se estimó por el método de la tina clase "A" (Doorenbos y Pruitt, 1977). Los datos de evaporación se obtuvieron de una tina ubicada en el mismo campo experimental que presentaba un coeficiente de tina (K<sub>p</sub>) de 0,79, determinado experimentalmente para la zona por Pire y Rodríguez (2007). Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET<sub>c</sub>) se usaron los coeficientes de cultivo (K<sub>c</sub>) tabulados por la FAO (Allen *et al.*, 1998). En el balance semanal se consideró la precipitación, siendo de 78 mm y 88 mm para los ciclos de los años 2008 y 2009, respectivamente.

## Muestreo en el cultivo

Para cuantificar el rendimiento del grano se cosechó el área de influencia de cada pluviómetro (4 m<sup>2</sup>). Para los componentes del rendimiento se seleccionaron 5 plantas al azar en cada sub-parcela. A cada planta se le contó el número de vainas, para el número de granos por vaina se escogieron al azar 10 vainas por planta, y para el peso de 100 semillas se hicieron 3 repeticiones del total de grano de las 5 plantas. El índice de cosecha se computó para cada una de las 5 plantas de cada sub-parcela, como la relación entre el peso del grano y el peso total de la planta.

Se calculó el coeficiente de uniformidad del rendimiento, de sus componentes y del índice de cosecha aplicando la ecuación (1).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Uniformidad de la aplicación del agua

El agua aplicada y las variables climáticas medias para cada evento de riego, en los dos ciclos de estudio, se presentan en el cuadro 1. Es de destacar, que todos los riegos aplicados fueron evaluados, siendo de 13 y 9 para los años 2008 y 2009, respectivamente. La ETo fue de 327 y 350 mm, y la ETc de 248 y 260 mm para los ciclos 2008 y 2009,

respectivamente. El total de agua aplicada (riego más lluvia) fue de 263 mm en el año 2008 y de 297 mm en el año 2009.

En la Figura 2, se presenta la evolución del coeficiente de uniformidad de los eventos de riegos individuales (CU), el coeficiente de uniformidad promedio (CUM) y acumulado (CUa) para los años 2008 y 2009. En la misma se observa que el CUa es superior al CU y al CUM a medida que avanza la campaña de riego, debido al efecto aleatorio del riego que hace que las zonas que menos agua reciben en un riego se compensen en los siguientes. Dicha compensación se debe a la aleatoriedad de la dirección y velocidad del viento entre los distintos eventos de riego. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Berenguer *et al.* (1997), Li y Rao (2000), Dechmi (2002), quienes también encontraron que la uniformidad acumulada o estacional es superior a la de los riegos individuales. En ambos años de estudio se nota que hay poca variación en el CUa y el CUM, en la mayoría de los casos, las cifras superan el 90 % para el primero y en la banda 85 % - 90% en el segundo; no así en el CU, donde se observa variación en los dos periodos de experimentación, con valores entre 82% y 91% en el 2008 y entre 76% y 90% en el año 2009. Es de destacar, en el año 2009, que a pesar de que en el último riego se obtiene un CU de 76%, los valores de CUM y CUa son de 86% y

Cuadro 1. Riegos evaluados y variables climáticas en los dos ciclos de estudio.

Nr	Tr	Año 2008				Año 2009					
		LAR	Vv	T	HR	Nr	Tr	LAR	Vv	T	HR
1	60	2,01	*	*	*	1	253	14,23	1,94	27,13	67,13
2	120	4,15	*	*	*	2	310	17,83	1,25	22,94	62,94
3	120	3,90	*	*	*	3	200	10,91	2,34	26,79	66,79
4	360	12,37	*	*	*	4	400	21,66	2,38	27,33	67,33
5	420	14,97	3,53	31,21	71,21	5	240	14,61	2,74	30,54	70,55
6	490	16,93	3,39	27,64	67,64	6	590	36,88	1,24	25,44	65,44
7	230	7,72	3,43	30,13	70,14	7	560	34,89	2,99	28,95	68,95
8	390	13,44	4,28	29,85	69,85	8	600	35,85	1,96	27,41	67,40
9	720	23,99	3,27	27,59	67,59	9	390	22,71	4,56	29,43	69,44
10	540	18,33	3,60	29,37	69,37						
11	130	4,46	1,29	24,96	64,96						
12	960	32,31	3,82	30,08	70,08						
13	900	30,56	2,50	28,32	68,32						
Total		185,14				209,57					

\* Información no disponible.

Nr: número de riegos evaluados; Tr: duración del riego (minutos); LAR: lámina media de agua recogida en los pluviómetros; Vv: velocidad del viento media durante el riego (m s<sup>-1</sup>); T: temperatura media durante el riego (°C); HR: humedad relativa media durante el riego (%).

90%, respectivamente. En general, los valores de uniformidad de reparto del agua pueden considerarse aceptables, ya que están por encima del valor mínimo recomendable ( $CU \geq 80\%$ ) para riego por aspersión (Keller y Bliesner, 1990). Desde el punto de vista del manejo del riego, parece más práctico considerar el CUa, ya que engloba más la realidad que ocurre durante todo el ciclo del cultivo, en comparación con el CU, que son valores aislados en algún momento del ciclo del cultivo.

En cuanto a la uniformidad de distribución (UD), UD promedio (UDm) y UD acumulado (UDa), todos estos parámetros presentan una tendencia

similar a los coeficientes de uniformidad antes descritos, con la salvedad de que los valores son menores. La UD es un parámetro más estricto que el CU para evaluar el riego, al considerar para su cuantificación aquellas áreas que menos agua reciben. Se evidencia que las cifras de UDa siempre fueron mayores que la UD y la UDm (Figura 3), por la misma razón que se explicó para los valores de CU en el párrafo anterior. En la Figura 3, se aprecia que los menores valores de la UD fueron en el riego 8 (71%) en el año 2008 y en el último riego (76%) en el 2009, esos riegos registraron las mayores velocidades del viento, con valores de  $4,3 \text{ m s}^{-1}$  y  $4,6 \text{ m s}^{-1}$ , respectivamente. Estas cifras se consideran bajas para

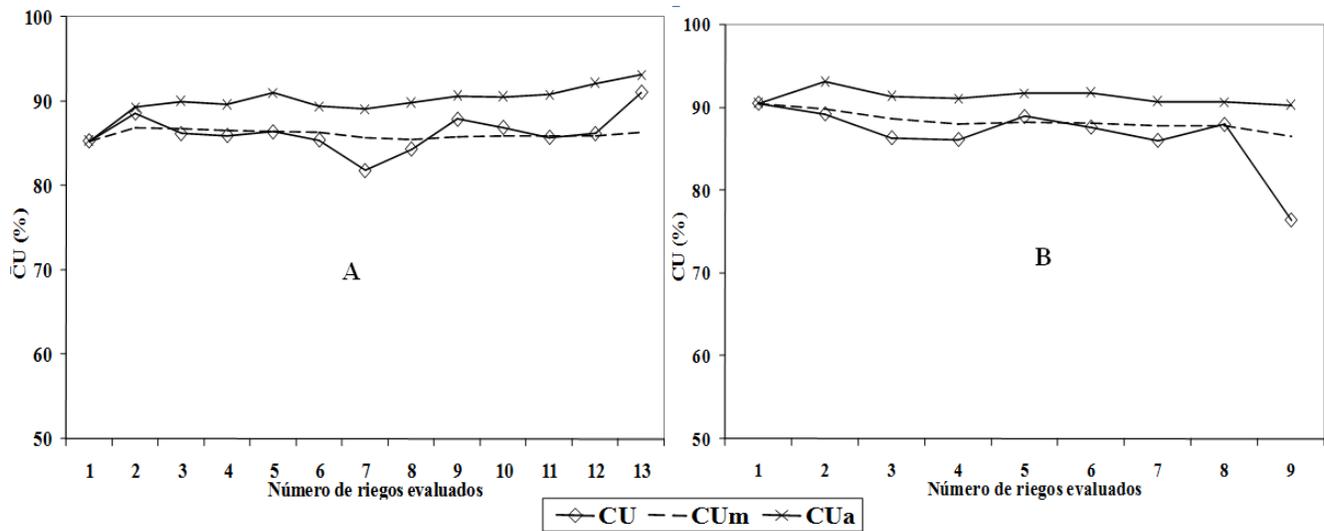


Figura 2. Evolución de los coeficientes de uniformidad de los riegos individuales (CU), promedio (CUm) y acumulado (CUa). A) Año 2008; B) Año 2009.

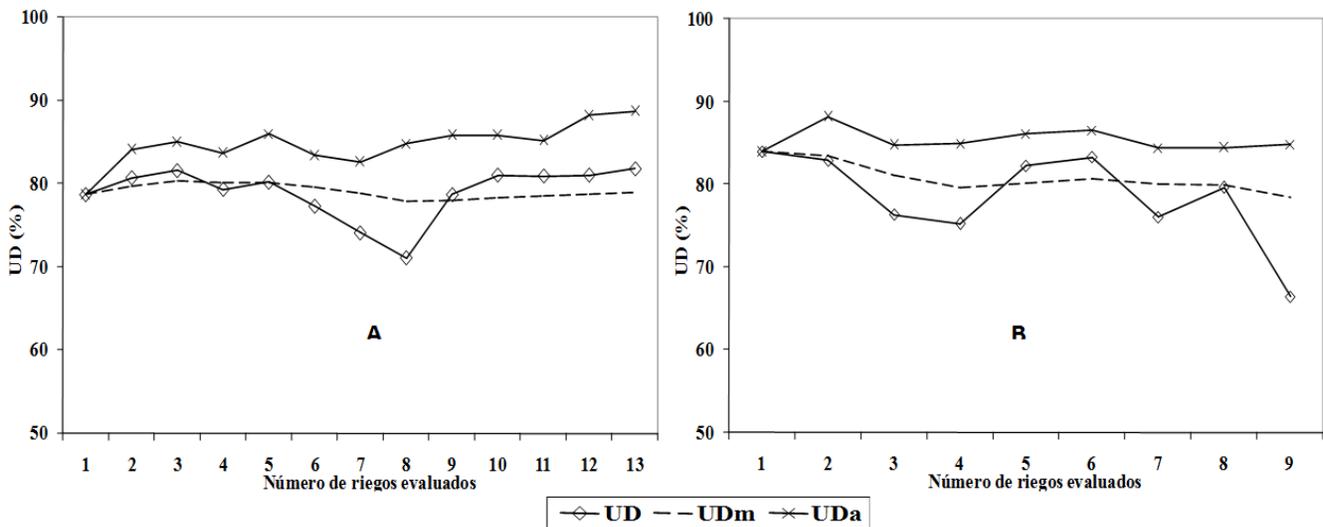


Figura 3. Evolución de la uniformidad de distribución de los riegos individuales (UD), promedio (UDm) y acumulado (UDa). A) Año 2008; B) Año 2009.

el riego por aspersión; sin embargo, la UDA correspondiente a dichos riego es del 85% para ambos años, valor que es aceptable para este método de riego y representa más la realidad en el manejo del riego. Berenguer *et al.* (1997), en un estudio sobre variabilidad de la aplicación del agua en riego por aspersión, encontraron valores de UD entre 72 % y 85%, los cuales son cifras próximas al rango (66% - 84%) que se obtuvo en los dos ciclos de este estudio; contrastando la UDA (92%) con la obtenida en este trabajo (88% y 85% para los años 2008 y 2009, respectivamente).

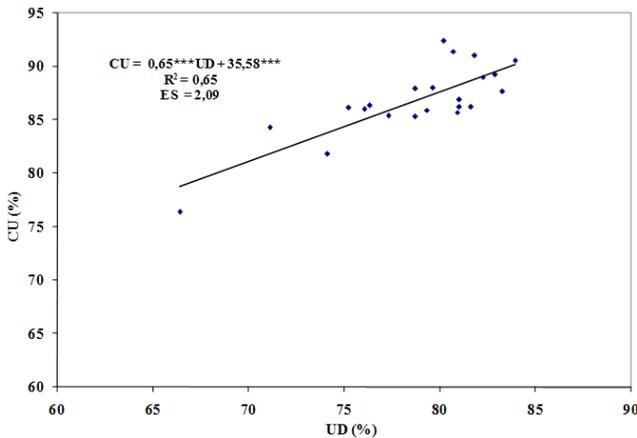


Figura 4. Relación entre el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad de distribución (UD) del agua aplicada para el conjunto de datos de los dos ciclo de estudio.

En la figura 4, se muestra la relación entre el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad de distribución en superficie (UD) con los datos de ambos años de ensayo, en ella se observa que dichos parámetros se ajustan adecuadamente a un regresión lineal, lo cual se confirma por la alta significancia del coeficiente de determinación ( $R^2$ ), de la pendiente y del término constante, así como un bajo error estándar (ES). Esta relación es útil para poder comparar ambos parámetros, ya que las consideraciones para su cálculo son distintas, así el CU es una representación estadística de los volúmenes captados en los pluviómetros, mientras la UD considera el promedio del agua recogida en el cuarto del área que menos agua recibe respecto al promedio del área total. De igual manera es importante la relación para comparar con trabajo previos, como por ejemplo, Keller y Bleisner (1990), Tarjuelo *et al.* (1999), Martínez (2004), quienes encontraron una relación entre ambos parámetros similar a la obtenida en este trabajo.

### Uniformidad de la humedad en el suelo

En la Figura 5, se muestran los valores del CU en superficie y en el perfil del suelo, tanto antes (CU<sub>sa</sub>) como después (CU<sub>sd</sub>) del riego, donde se aprecia, en ambos años de experimentación, que la uniformidad de la humedad en el suelo siempre fue mayor que la uniformidad de aplicación del agua en la superficie. Estas diferencias obedecen a la redistribución del agua en el suelo producto de las diferencia de potenciales que se originan entre las zonas que reciben diferentes cantidades de agua, contribuyendo a que se homogenice la humedad en el

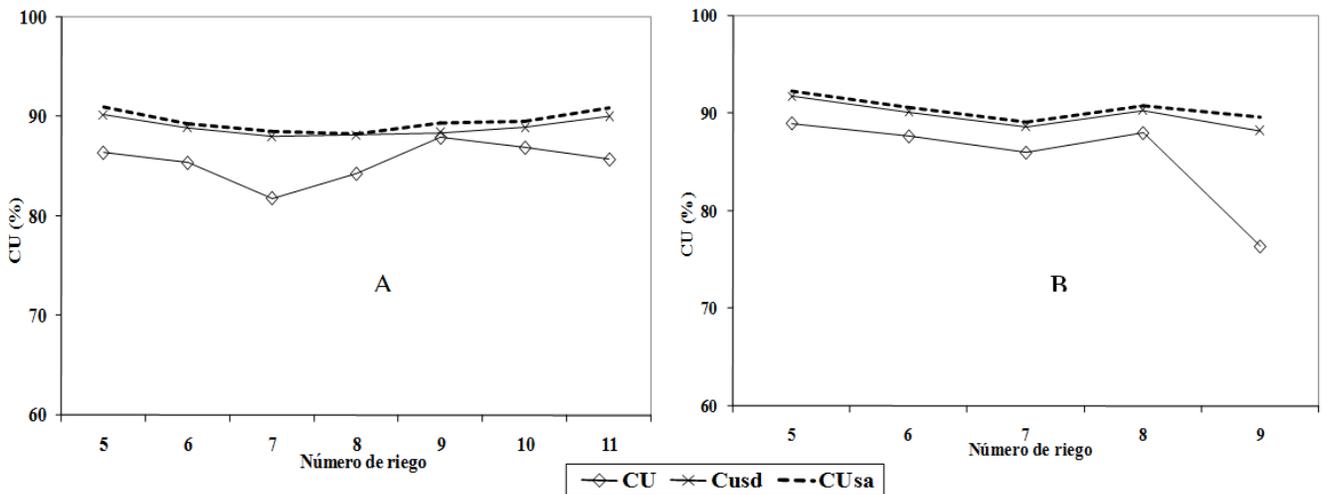


Figura 5. Evolución del coeficiente de uniformidad del agua aplicada en superficie (CU) y del contenido en agua en el suelo antes (CU<sub>sa</sub>) y después (CU<sub>sd</sub>) del riego. A) Año 2008; B) Año 2009.

suelo. Estos resultados coinciden con los reportados por Li y Kawano (1996), Li (1998), Li y Rao (2000), Jiménez *et al.* (2007), quienes encontraron que el CU es mayor al CU en sistemas de aspersión estacionario. En la Figura 5 se observa que la uniformidad antes y después del riego tienen la misma tendencia, con valores ligeramente mayores en el CU<sub>sa</sub>, lo cual se debe al mayor tiempo que tiene el agua para redistribuirse. Desde el punto de vista de manejo del riego es más importante el CU<sub>sd</sub>, ya que está asociado con la recarga de agua en el perfil del suelo. En los dos ciclos de ensayo se observa que la gráfica del CU tiene oscilaciones, no así las líneas de la uniformidad en el suelo donde su tendencia presenta valores con menos variación. Desde el punto de vista agronómico parece más importante la uniformidad de la humedad en el suelo, que alcanza valores del orden del 90%, ya que el rendimiento del cultivo responde a la humedad del suelo disponible más que al agua aplicada en superficie.

Referente a la UD en superficie y en el perfil del suelo antes (UD<sub>sa</sub>) y después (UD<sub>sd</sub>) del riego, en la Figura 6 se observa que la evolución de estos parámetros es muy parecida a la de los coeficientes mostrados en la Figura 5. Claramente se aprecia que la uniformidad de la humedad en el suelo fue superior a la medida en la superficie del mismo, siendo la UD<sub>sa</sub> ligeramente mayor que la UD<sub>sd</sub>. De nuevo, el mayor tiempo para que la humedad se redistribuya en el perfil del suelo y alcance una mayor homogeneidad, explican la diferencia. A pesar de los cambios bruscos que se observan en las gráficas de la UD, en los dos años de estudio, las líneas de evolución de la uniformidad en el suelo conservan

una pendiente suave y con valores por encima del 80%, cuando las cifras de la UD estuvieron por debajo de dicho valor en la mayoría de los riegos evaluados.

### Uniformidad del agua aplicada, del rendimiento y sus componentes y del índice de cosecha

En el Cuadro 2, se presenta el coeficiente de uniformidad (CU) del riego (del agua aplicada en superficie y del contenido en agua en el suelo), del rendimiento y sus componentes y del índice de cosecha para los dos años de ensayo. El CU del rendimiento (CU<sub>r</sub>) resultó de 87 y 84,5% para los años 2008 y 2009, respectivamente, valores que están comprendidos entre las cifras obtenidas para el CU medio de los riegos individuales (CU<sub>m</sub>) y los coeficientes acumulado (CU<sub>a</sub>) y de la humedad en el suelo (CU<sub>s</sub>). En dicho cuadro se observa que los valores de CU<sub>r</sub> están más próximos a los CU<sub>s</sub>, y principalmente al CU<sub>s</sub> después del riego (CU<sub>sd</sub>), lo que refleja que el CU<sub>r</sub> está más asociado al CU<sub>sd</sub>. En cuanto a los componentes del rendimiento, es importante resaltar la alta uniformidad del número de granos por vaina y del peso de 100 semillas, e igualmente el parámetro índice de cosecha, que presenta la mayor uniformidad, en ambos años de estudio.

### Agua aplicada, rendimiento y sus componentes e índice de cosecha

En el Cuadro 3, se muestra la media y coeficiente de variación para la lámina de riego acumulada, el rendimiento y sus componentes e

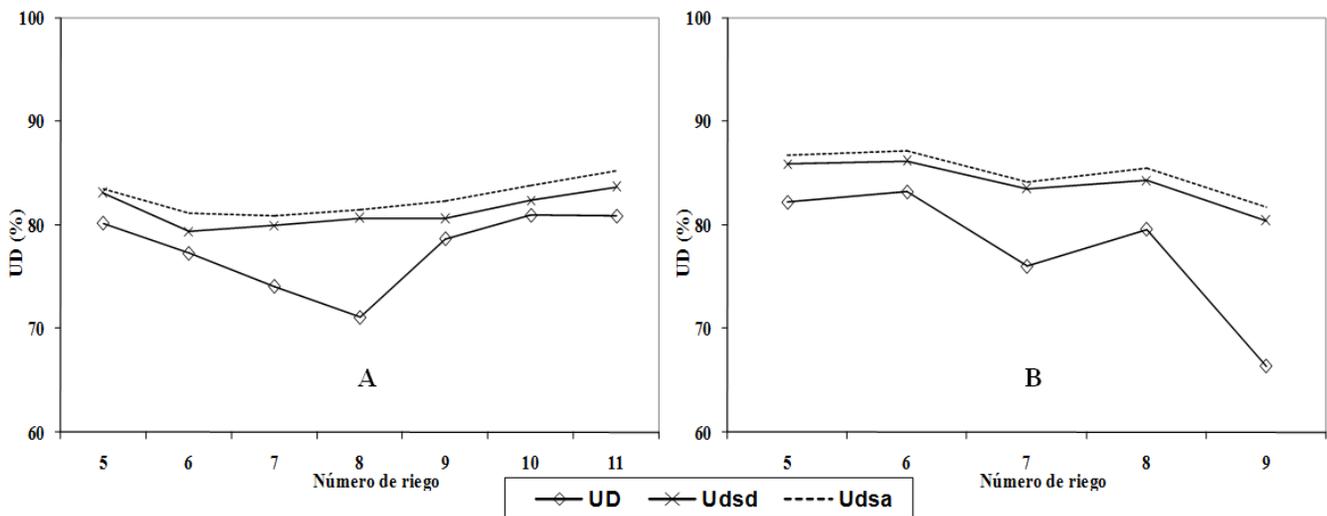


Figura 6. Evolución de la uniformidad de distribución del agua aplicada en superficie (CU) y del contenido en agua en el suelo antes (UD<sub>sa</sub>) y después (UD<sub>sd</sub>) del riego. A) Año 2008; B) Año 2009.

índice de cosecha para los dos años de experimentación. Aunque se aprecia una diferencia de la lámina de riego aplicada durante cada ciclo del cultivo, las mismas corresponden a las necesidades hídricas calculadas para cada ciclo, lo cual se evidencia en la similitud del rendimiento, sus componentes y el índice de cosecha. Se observan valores ligeramente mayores de variabilidad en el rendimiento, sus componentes e índice de cosecha durante el año 2009 que en el 2008, lo cual es producto de la mayor variabilidad de las láminas de riego acumulada que recibió cada una de las parcelas elementales del ensayo, confirmándose esto también con los valores de uniformidad presentados en la

Cuadro2. Coeficientes de uniformidad del riego, del rendimiento y sus componentes e índice de cosecha.

Coeficiente de uniformidad (%)	Año 2008	Año 2009
Agua aplicada medio	87,0	84,5
Agua aplicada acumulada	93,1	90,3
Humedad del suelo antes riego	90,9	89,7
Humedad del suelo después riego	90,0	88,2
Rendimiento	89,1	86,9
Vainas por planta	87,3	85,4
Granos por vaina	94,6	94,0
Peso 100 semillas	94,2	92,3
Peso grano por planta	85,7	82,1
Índice de cosecha	97,9	96,4

Cuadro3. Media y coeficiente de variación (CV) para la lámina de riego acumulada, el rendimiento y sus componentes e índice de cosecha.

Variable	Año 2008		Año 2009	
	Media	CV (%)	Media	CV (%)
Lámina de riego acumulada (mm)	185,14	9,48	209,57	12,37
Rendimiento (g m <sup>-2</sup> )	145,15	13,03	142,34	16,94
Vainas Plantas <sup>-1</sup>	17,00	17,56	17,22	17,77
Granos Vaina <sup>-1</sup>	5,71	7,24	5,73	7,35
Peso grano Planta <sup>-1</sup> (g)	18,47	17,85	19,24	22,03
Peso cien semillas (g)	22,18	7,58	21,38	9,84
Índice de cosecha	0,64	2,91	0,64	4,50

cuadro 2. Resultados similares reportan Dechmi *et al.* (2003), trabajando con el cultivo de maíz, quienes encontraron que la variabilidad del rendimiento del grano se debió en parte al déficit de agua como resultado de la desuniformidad de la distribución de agua durante el ciclo del cultivo. Lozada (1993), evaluando la estabilidad del rendimiento en caraota (variedad Tacarigua), en Buena vista, estado Lara, observó que el peso de 100 semillas estuvo comprendido entre 18,1 g y 26,0 g y el número de vainas por planta fluctuó entre 12,2 y 23,3, estando los resultados de este trabajo dentro de este rango. Para la misma zona obtuvo un rendimiento de 113,8 g m<sup>-2</sup>, siendo inferior al encontrado en este estudio (Lozada, 1997). Díaz *et al.* (2001), en un estudio realizado en el estado Aragua, reportaron un peso de 100 semillas promedio de 17,8 g, un número de granos por vaina de 5,1 y 15 vainas por planta, cifras que son inferiores a las observadas en esta investigación; asimismo, informan que el rendimiento fue de 221,5 g m<sup>-2</sup>, cantidad superior a la obtenida en este trabajo, pero para una densidad de 175184 plantas por hectárea, lo que representa un 22,89 % más que la empleada en este experimento.

## CONCLUSIONES

Para el diseño y manejo del riego, es más importante considerarla uniformidad de los riegos acumulados, ya que engloba lo que ocurre durante todo el ciclo del cultivo, en comparación con la uniformidad de los riegos individuales, que son valores aislados en algún momento del ciclo del cultivo.

Como ya es conocido, la uniformidad de los riegos acumulados y de la humedad en el suelo resultó mayor y con menor variación a lo largo del ciclo del cultivo que la de los riegos individuales.

La uniformidad de los riegos acumulados podría ser un parámetro suficiente para tener una idea de la uniformidad de la humedad en el suelo, y con la ventaja de ser más práctico y económico.

Los valores de uniformidad del rendimiento del cultivo de caraota encontrados tienen mayor aproximación a los de la uniformidad de la humedad en el suelo después del riego.

La variabilidad del rendimiento del cultivo, sus componentes y del índice de cosecha fue mayor cuando la variabilidad de la lámina de agua acumulada en las subparcelas también lo fue.

## AGRADECIMIENTO

Los autores quieren expresar su agradecimiento al Consejo de Desarrollo Científico Humanístico y tecnológico (CDCHT – UCLA) por el financiamiento del proyecto 014-AG-2007.

## LITERATURA CITADA

- Allen, R.; L. Pereira, D. Raes and M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage, paper n° 56, FAO, Rome.
- Berenguer, M. J.; J. Faci y A. Martínez. 1997. Variabilidad del rendimiento del sorgo y del agua aplicada en una cobertura fija de riego por aspersión. Invest. Agr. Prod. Prot. Veg. 12: 89-109.
- Christiansen, J. 1942. Irrigation by sprinkling. University of California. Agricultural Experiment Station. Bulletin 670. 124 pp.
- Dechmi, F. 2002. Gestión del agua en sistemas de riego por aspersión en el Valle del Ebro: análisis de la situación actual y simulación de escenarios. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida. España.
- Dechmi, F.; E. Playan, J. Cavero, J. M. Faci and A. Martínez Cob. 2003. Wind effects on soil set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays*). Irrig. Sci. 22:67-77.
- Dechmi, F.; E. Playan, J. Cavero, A. Martínez Cob and J. M. Faci. 2004. Couple crop and solid set sprinkler simulation model. I: Model development. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. ASCE, 130 (6): 499-510.
- Díaz, C.; N. Figueroa y R. Warnock. 2001. Estudio de crecimiento y desarrollo de la caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo diferentes densidades de población. III. Rendimiento y sus componentes. Rev. Fac. Agron. (Maracay) 27:105-117.
- Dogan, E.; G. C. Clark, D. H. Rogers and V. L. Martin. 2002. Systematic sprinkler nonuniformity effect of corn yield at south central Kansas. ASAE Annual International Meeting/CIGR XVth World Congress, Chicago, Illinois, USA.
- Doorenbos, J. y W. Pruitt. 1977. Las necesidades de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje n° 24. FAO, Roma.
- Faci, J. y A. Bercero. 1991. Efecto del viento en la uniformidad y en las pérdidas por evaporación y arrastre en el riego por aspersión. Invest. Agr. Prod. Prot. Veg. 6 (2): 171-182.
- Jiménez, M.; A. Moreno, J. Córcoles, J. Ortega, J. Tarjuelo and J. de Juan. 2007. Comportamiento del cultivo de cebolla frente a la heterogeneidad en la aplicación del agua de riego. Actas de Horticultura 48: 274-277.
- Jiménez, J.; J. de Juan, J. Tarjuelo y J. Ortega. 2010. Effect of irrigation uniformity on evapotranspiration and onion yield. Journal of Agricultural Science 148: 139-157.
- Keller, J. and R. D. Bliesner. 1990. Sprinkle and trickle irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA.
- Letey, J. 1985. Irrigation uniformity as related to optimum crop production- Additional research is needed. Irrig. Sci. 6: 253-363.
- Li, J. 1998. Modelling crop yield as affected by uniformity of sprinkler irrigation system. Agricultural Water Management. 38: 135-146.
- Li, J. and H. Kawano. 1996. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation. Agricultural Water Management. 32: 29-36.
- Li, J. and M. Rao. 2000. Sprinkler water distributions as affected by winter wheat canopy. Irrig. Sci. 20: 29-35.
- Lozada, C. 1993. Evaluación de cultivares de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) y estimación de la estabilidad del rendimiento, en zonas altas del estado Lara. Trabajo de ascenso. Decanato de Agronomía. UCLA. Barquisimeto.
- Lozada, C. 1997. Evaluación de 14 cultivares de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.) y estimación de la estabilidad del rendimiento en zonas altas del estado Lara. Bioagro 9 (1):1 2-19
- Martínez, R. 2004. La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el

- rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mays* L.). Tesis Doctoral. ETSIA, Universidad de Castilla-La Mancha. Albacete-España.
- Merriam J. L. and J. Keller. 1978. Farm Irrigation System evaluation: a guide for management. Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Montero, J.; J. Tarjuelo and J. Ortega. 2000. Heterogeneity analysis of the irrigation in fields with medium size sprinklers. Disponible en: <http://ecommons.cornell.edu/bitstream/1813/10207/1/Sprinklers.PDF>. Consultado 17-02-2012.
- Or, D. and J. Hanks. 1992. Soil water and crop yield spatial variability induce irrigation nonuniformity. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 56: 226-233.
- Ortiz, J. N.; J. A. de Juan, and J. M. Tarjuelo. 2010. Analysis of water application uniformity from centre pivot irrigation and its effect on sugar beet (*Beta vulgaris* L.) yield. *Biosystems Engineering.* 105 (3): 367-369.
- Pire, R. y R. Rodríguez. 2007. Evapotranspiración referencial (ET<sub>o</sub>) medida vs estimada en Tarabana (10° 01' LN), estado Lara, Venezuela. *Revista Unellez Ciencias Técnicas* 25: 58-66.
- Playan, E.; R. Salvador, J. M. Faci, N. Zapata, A. Martínez Cob and I. Sánchez. 2005. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinklers solid-set and moving lateral. *Agricultural Water Management* 76: 139-159.
- Salomon, K. 1985. Yield relate interpretations of irrigation uniformity and efficiency measures. *Irrig. Sci.* 5: 161-172.
- Solomon, K; D. Zoldoske and J. Oliphant. 1996. Laser optical measurement of sprinkler drop sizes. Center for Irrigation Technology, California State University, Fresno, CA, USA. Disponible en: [http://cit.cati.csufresno.edu/research\\_publications/96/961101/index.html](http://cit.cati.csufresno.edu/research_publications/96/961101/index.html). Consultado 23-02-2012.
- Stern, J. and E. Bresler. 1983. Nonuniform sprinkler irrigation and crop yield. *Irrig. Sci.* 4: 17-29.
- Tarjuelo, J. M. 1999. El riego por aspersión y su tecnología. 2ª Edición. Ediciones Mundi Prensa. España.
- Tarjuelo, J. M.; M. Valiente and J. Lozoya. 1992. Working conditions of a sprinkler to optimize the application of water. *J. Irrig. Drain. Eng. ASCE* 118 (6): 895-913.