

# Calibración y validación de un modelo de REPARTO DE AGUA de BOQUILLAS de plato fijo

Ouazaa, S.<sup>1</sup>, Burguete, J.<sup>1</sup>, Paniagua, P.<sup>1</sup>, Salvador, R.<sup>1</sup> y Zapata, N.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento Suelo y Agua. Estación Experimental Aula Dei (EEAD-CSIC). Apdo. 202, 50080, Zaragoza,

[sofiane.ouazaa@eead.csic.es](mailto:sofiane.ouazaa@eead.csic.es); [jbarguete@eead.csic.es](mailto:jbarguete@eead.csic.es); [pilucap@eead.csic.es](mailto:pilucap@eead.csic.es); [rsalvador@eead.csic.es](mailto:rsalvador@eead.csic.es); [y.zapata@csic.es](mailto:y.zapata@csic.es)

## RESUMEN

En la actualidad, los modelos de simulación resultan imprescindibles en la investigación de los sistemas de riego para el diseño de nuevos regadíos o la mejora de los sistemas existentes. La simulación del riego permite evitar la laboriosidad de los ensayos de campo. La teoría balística ha sido utilizada con éxito en la modelización del reparto de agua de los aspersores de impacto. Sin embargo, la modelización de los nuevos emisores utilizados en las máquinas de riego por aspersión precisa incorporar a la teoría balística las pérdidas de carga que se originan en el choque del chorro con el plato deflector que reducen la velocidad de las gotas. En este trabajo se caracterizaron experimentalmente las pérdidas de carga y el reparto de agua de los emisores de plato fijo (EPF) más utilizados en las máquinas comerciales. Se calibró y se validó el modelo balístico presentado en Playán et al. (2006) para reproducir el reparto de agua de dichos emisores en diferentes condiciones técnicas y meteorológicas. Los resultados muestran que las pérdidas de carga que ocasionan este tipo de platos deflectores se reducen con el incremento del tamaño del emisor, pasando del 80% para tamaños de boquilla pequeños (2 mm) hasta valores del 45% para tamaños de boquillas superiores a 5 mm. Los valores de pérdidas de carga en función del tamaño de la boquilla se han incorporado al modelo balístico para poder simular el reparto de agua de los emisores de plato fijo. El modelo calibrado reproduce los patrones de reparto de agua tanto en condiciones de viento en calma como en condiciones de viento de forma satisfactoria.

Figura 1. Emisor de plato Fijo (a) y Emisor de plato Rotatorio (b).



Figura 2. El efecto del choque del chorro con el plato

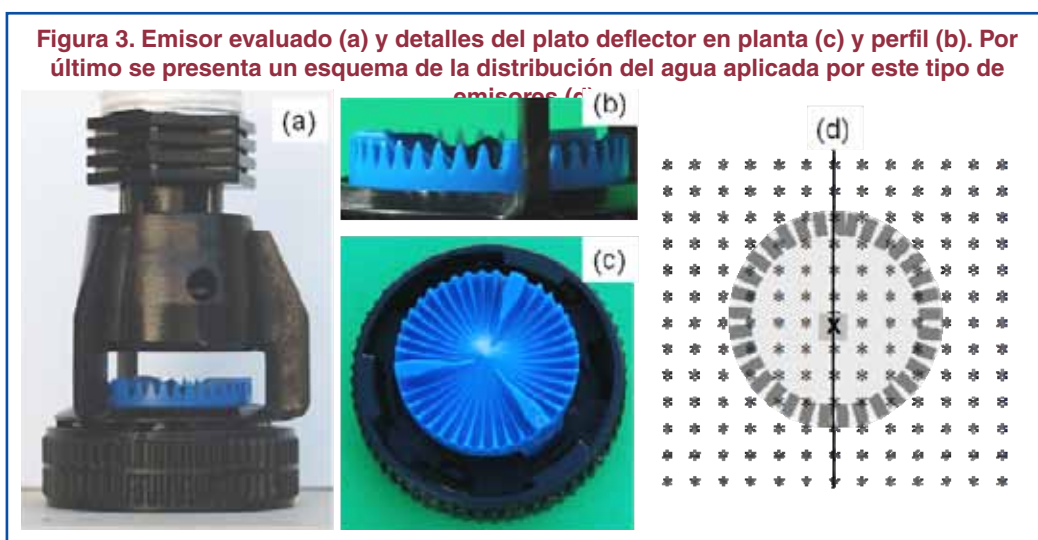


## 1- INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

El desarrollo de nuevos emisores ha desplazado el uso de los aspersores de impacto en las máquinas de riego automotrices. Estos emisores reducen los requerimientos de presión, sin afectar a la calidad del riego (Ommary y Sumner, 2001). Entre los emisores más utilizados en máquinas automotrices están los emisores de plato fijo (EPF) (Figura 1a) y los emisores de plato rotatorio (EPR) (Figura 1b). Comparando los EPF con los EPR, los primeros son más baratos y robustos ya que no tienen piezas móviles, mientras que los segundos presentan mejores uniformidades de reparto de agua (Playán y colaboradores 2004).

La teoría balística (Fukui y colaboradores >>>

►►► 1980) ha sido utilizada con éxito en la modelización del reparto de agua de los aspersores de impacto (Montero y colaboradores 2001; Playán y colaboradores 2006). Sin embargo, la modelización de los nuevos emisores precisa incorporar a la teoría balística el efecto del choque del chorro con el plato deflector (Sánchez-Burillo y colaboradores en prensa). Este choque ocasiona pérdidas de carga que reducen la velocidad de las gotas. La presión de trabajo, el diámetro de la boquilla y el diseño del aspersor y su plato deflector son importantes en la determinación de la energía cinética de las gotas (King y Bjerneberg, 2010). Existen numerosos trabajos en la literatura que caracterizan la energía cinética de las gotas en máquinas de riego (King y Bjerneberg 2010, 2012), la mayoría orientados a caracterizar su impacto sobre las características hidráulicas del suelo. Sánchez-Burillo et al. (en prensa) presentan la caracterización de la velocidad inicial de las gotas de una boquilla equipada con plato fijo para modelizar el efecto del



choque e incorporarlo a la teoría balística. El objetivo de este trabajo es calibrar y validar el modelo balístico presentado en Playán et al. (2006) para reproducir el reparto de agua de EPF en diferentes condiciones técnicas y meteorológicas. Para ello, para el rango de tamaños de boquilla que equipan un pivót (2 mm a 9 mm) en las condiciones de presión más habituales se han abordado los siguientes objetivos específicos:

choque e incorporarlo a la teoría balística.

El objetivo de este trabajo es calibrar y validar el modelo balístico presentado en Playán et al. (2006) para reproducir el reparto de agua de EPF en diferentes condiciones técnicas y meteorológicas. Para ello, para el rango de tamaños de boquilla que equipan un pivót (2 mm a 9 mm) en las condiciones de presión más habituales se han abordado los siguientes objetivos específicos:

- 1) Caracterizar experimentalmente las pérdidas de carga que se originan en el choque del chorro con el plato deflector de los EPF, en el rango de tamaños de boquillas que equipan un pivót. ►►►

LA VENTAJA DE LINDSAY  
**SOLUCIONES DE RIEGO QUE INCREMENTAN SUS BENEFICIOS**



Lindsay es el fabricante de riego que puede desarrollar desde una única empresa, el sistema adecuado para las necesidades exclusivas de cada usuario. Hemos combinado los beneficios de todas las empresas y todos los productos de Lindsay en un paquete simple, pero eficaz: el plan de cartera de servicios.

[www.lindsayeuropees.com](http://www.lindsayeuropees.com)

L'Epinglerie 72300 La Chapelle d'Aligné, Francia • Tel. +34 955 114 451 • [www.lindsayeuropees.com](http://www.lindsayeuropees.com)



© 2013 Lindsay. Todos los derechos reservados.



210A089

►►► 2) Caracterizar experimentalmente el reparto de agua de los EPF en diferentes condiciones técnicas y meteorológicas.

3) Calibrar los parámetros del modelo balístico que permitan reproducir los patrones de reparto de agua evaluados experimentalmente.

**2- MATERIAL Y MÉTODOS**

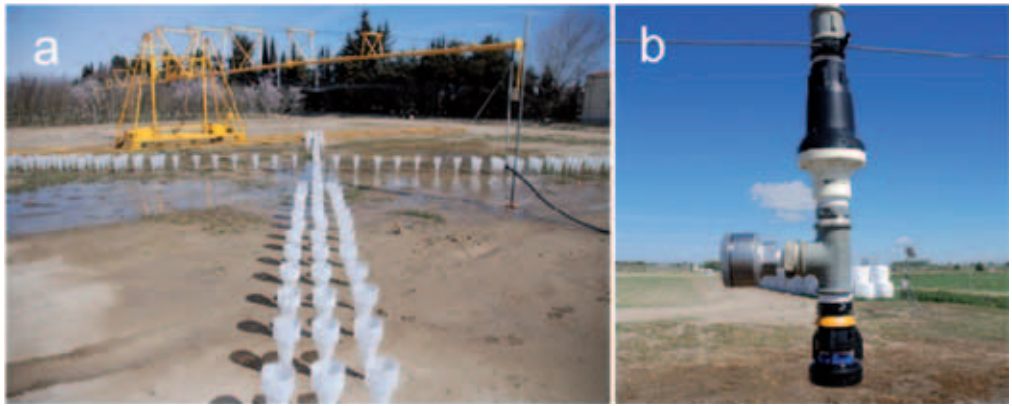
Los emisores que se han seleccionado en este trabajo pertenecen a la serie 3TN de Nelson Irrigation Corporation y están equipados con plato deflector fijo de color azul con 33 acanaladuras (D3000-Azul) (Figura 3). Estos emisores de plato fijo se han seleccionado por ser los más habituales dentro de su gama.

**• Caracterización de las pérdidas de carga que se originan en el choque del chorro con el plato deflector**

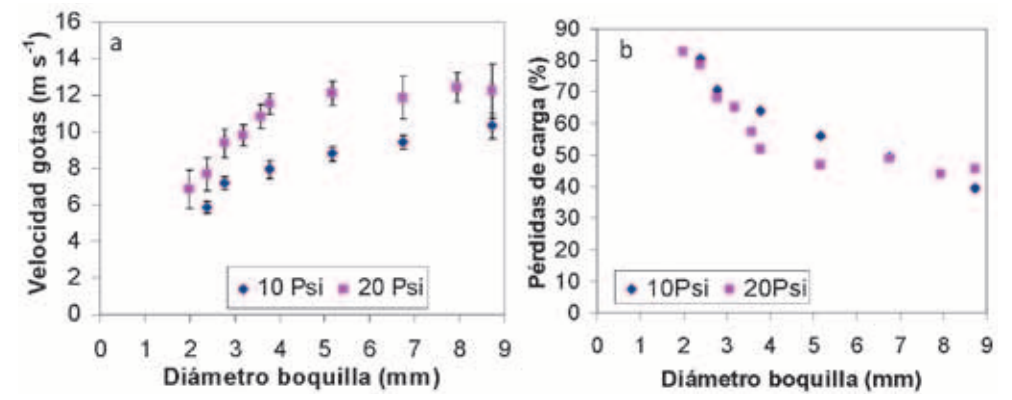
Se han seleccionado diez tamaños de boquillas (desde 2 mm hasta 8,7 mm) de todo el rango de tamaños que cubre el

equipamiento de un pívot comercial y dos presiones de trabajo (10 PSI y 20 PSI). Se ha utilizado la metodología propuesta en Sánchez-Burillo y colaboradores (en prensa) para caracterizar la velocidad de salida de las gotas del plato deflector. Dicha metodología se basa en la realización de fotos de baja velocidad en laboratorio (Salvador y colaboradores 2009). Las

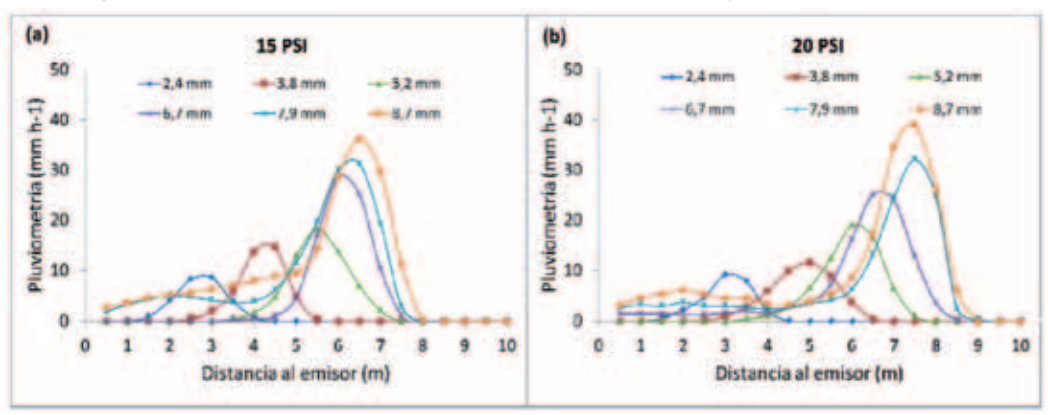
**Figura 4. Esquema de la parcela de ensayos con la disposición de los pluviómetros (a) y la localización del emisor (b).**



**Figura 5. a) Velocidad inicial de las gotas y ± una desviación estándar. b) pérdidas de carga en el choque con el plato deflector en función del tamaño de la boquilla, para las dos presiones ensayadas.**



**Figura 6. Curvas radiales del EPF a diferentes presiones y tamaño de boquilla.**



fotos se realizan en el punto en el que el chorro que sale de la placa deflectora se rompe en gotas, zona muy cercana a la salida del plato deflector. Utilizando una velocidad relativamente baja de obturación, las gotas se representan en las fotos como cilindros, permitiendo así la identificación del diámetro de la gota, la longitud del recorrido y el ángulo ver- ►►►

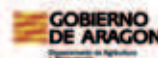
# FIMA

50 YEARS  
1964-2014

11-15 / 02 / 2014

**38 FERIA INTERNACIONAL DE LA MAQUINARIA AGRÍCOLA**  
INTERNATIONAL FAIR OF AGRICULTURAL MACHINERY

**ZARAGOZA**  
**ESPAÑA / SPAIN**  
[www.fima-agricola.es](http://www.fima-agricola.es)



►►► tical. La velocidad de la gota se deriva de la longitud recorrida y de la velocidad de obturación (Salvador y colaboradores 2009). Esta velocidad permite a su vez determinar las pérdidas de carga que se producen en el choque del chorro con el plato deflector. Los resultados de pérdidas de carga se incorporaron al modelo balístico.

● *Caracterización experimental del reparto de agua de los EPF en diferentes condiciones técnicas y meteorológicas*

Se seleccionaron seis tamaños de boquillas desde los 2,4 mm a los 8,7 mm. Para evaluar diferentes presiones de trabajo se instalaron reguladores de presión de 15 y 20 PSI (presiones habituales de funcionamiento de los EPF). Además, se evaluaron tres niveles de velocidad del viento, calma ( $V_{vto} \leq 1 \text{ ms}^{-1}$ ), medio ( $1 \text{ ms}^{-1} < V_{vto} \leq 3 \text{ ms}^{-1}$ ) y fuerte ( $V_{vto} > 3 \text{ ms}^{-1}$ ). Las evaluaciones del patrón de reparto de agua para cada tamaño de boquilla, presión y velocidad del viento se realizaron de forma individual. Durante los ensayos se registraron a 2 m del suelo la velocidad del viento ( $V_{vto}$ ,  $\text{ms}^{-1}$ ) y su dirección con una frecuencia de un segundo mediante una estación meteorológica automática instalada en la parcela adyacente. La presión de trabajo se registró cada 2 minutos mediante un transductor de presión colocado tras el regulador de presión en y antes de la boquilla (Figura 4b). La duración de los ensayos dependió del tamaño de la boquilla, así para los tamaños más pequeños la duración era de dos horas, tiempo que se iba acortando conforme aumentábamos el tamaño de las boquillas.

La Figura 4 muestra el dispositivo experimental de los ensayos de campo para caracterizar el reparto de agua, con la localización del emisor, el regulador de presión el transductor y la disposición de los pluviómetros. En la Figura 4b también aparece la foto del tipo de boquilla y plato deflector.

● *Calibración y validación de los parámetros del modelo balístico que permiten reproducir los patrones experimentales de reparto de agua de los EPF estudiados*

En este trabajo se ha utilizado la teoría balística para la simulación de la trayectoria que siguen las gotas emitidas por el emisor de plato fijo. La teoría balística considera el efecto del viento como el principal agente de distorsión de la trayectoria de

**Tabla 1. Resultados de la calibración de  $D_{50}$  y  $n$  para los seis tamaños de boquillas y las dos presiones de trabajo.**

Presión	Tamaño Boquilla (mm)	$D_{50}$ (mm)	$n$	ECM ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	$r$
15 PSI	2,4	1,10	4,2	0,49	0,98
	3,8	1,30	6,5	0,72	0,99
	5,2	2,20	7,3	0,76	0,99
	6,7	2,40	7,5	0,85	0,99
	7,9	2,60	7,0	2,67	0,97
	8,7	2,50	6,0	2,57	0,97
20 PSI	2,4	1,20	4,6	0,32	0,99
	3,8	1,60	6,4	0,58	0,99
	5,2	2,00	8,0	0,48	0,99
	6,7	2,40	8,0	1,29	0,99
	7,9	2,50	7,4	2,36	0,97
	8,7	2,50	7,0	2,22	0,98

la gota (Fukui y colaboradores 1980; Playán y colaboradores 2006). De acuerdo con esta teoría, un emisor es considerado como un aparato que emite gotas de diferentes diámetros. La trayectoria de las gotas desde la salida del aspersor hasta alcanzar la superficie del suelo está influenciada por su vector velocidad inicial, la fuerza gravitacional (que actúa en la dirección vertical), el vector viento y la fuerza de resistencia aerodinámica (que se aplica en la dirección opuesta al movimiento relativo de la gota en el aire, Vories y colaboradores 1987; Carrión y colaboradores 2001; Dechmi y colaboradores 2004).

La teoría balística requiere la caracterización de las distribuciones de tamaños de gotas. El modelo de Kincaid y colaboradores (1996) se utilizó para caracterizar las distribuciones de los tamaños de gota de distintos tipos de emisores. El modelo considera dos parámetros  $D_{50}$  (es el diámetro de gota medio) y  $n$  (es un parámetro de ajuste) que se calibran en condiciones sin viento y para ello se hace un barrido de valores de ambos parámetros y se comparan los resultados del patrón simulado con el medido en campo.

Para conseguir la deformación, de la distribución del agua, originada por el viento Seginer et al. (1991) y Tarjuelo et al. (1994) propusieron una corrección del coeficiente de resistencia aerodinámico  $C$  en condiciones de viento. Los dos nuevos parámetros empíricos  $K_1$  y  $K_2$  que definen el nuevo coeficiente aerodinámico son fundamentales para conseguir un buen ajuste entre los modelos simulados y los realmente medidos en campo. Con el parámetro  $K_1$ , ►►►

►►► el modelo de distribución de agua se estrecha simétricamente en la dirección perpendicular a la dirección del viento, con el  $K_2$  el modelo simulado se acorta en su parte anterior y se alarga en su parte posterior, según la dirección del viento, pero sin ningún efecto en la dirección perpendicular al viento.

### 3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las determinaciones de las velocidades de salida de las gotas para los diferentes tamaños de boquillas y presiones evaluadas aparecen en la Figura 5a. Las barras verticales representan  $\pm$  una desviación estándar de los valores medios de velocidad, establecidos para un número mínimo de 20 gotas. La Figura 5b presenta las pérdidas de carga en porcentaje que se originan en el choque con el plato deflector en función del tamaño de boquilla y de la presión de trabajo.

Los resultados indican que las pérdidas de carga están muy relacionadas con el tamaño de boquilla, pasando de pérdidas de carga del 80% para los tamaños más pequeños (2 mm) hasta pérdidas alrededor del 45% para los tamaños más grandes (> 5 mm).

El efecto de la presión en los rangos analizados es aparentemente despreciable. Los valores de pérdidas de carga en función del tamaño de la boquilla se han incorporado al modelo balístico para poder simular el reparto de agua de los EPF.

La Figura 6a presenta la pluviometría radial de los EPF trabajando a 15 PSI para los seis tamaños de boquilla analizados. La Figura 6b presenta datos similares para los mismos emisores trabajando a una presión de 20 PSI. Se observa un aumento progresivo de la pluviometría máxima al aumentar el tamaño de la boquilla. Este incremento es especialmente importante entre 5,2 mm y 6,7 mm (en 15 Psi). También se produce un desplazamiento del punto donde se concentra la pluviometría máxima con el incremento del tamaño de la boquilla. Este efecto de desplazamiento del pico de precipitación también se produce con el incremento de la presión.

Los resultados de la calibración de  $D_{50}$  y  $n$  para los diferentes tamaños de la boquilla y las dos presiones de trabajo (15 y 20 PSI) se presentan en la Tabla 1. Los valores del coeficiente de correlación  $r$  son muy elevados, con valores iguales o superiores a 0,97. ►►►



Avda. La Crosa s/n - 17168 Vilobi d'Onyar (Girona)  
Tfno: 972 474 137 - comercial@ampsprayers.com

## AMPLIACIÓN DE LA GAMA DE PULVERIZADORES WORKER DE AMP SPRAYERS

[ SUSPENDIDO CON FRONTAL ► ]



[ ARRASTRADO ◯◯ ]



Nueva gama de pulverizadores suspendidos AMP Sprayers Serie WORKER P, que comprenden cisternas de nuevo diseño de 1300, 1600 y 1900 l. (con capacidad real de 1400, 1700 y 2000 l.).

También nueva gama de pulverizadores frontales WORKER F de 1100 y 1500 l. de capacidad nominal (con 100 l. más de capacidad real cada uno aproximadamente).

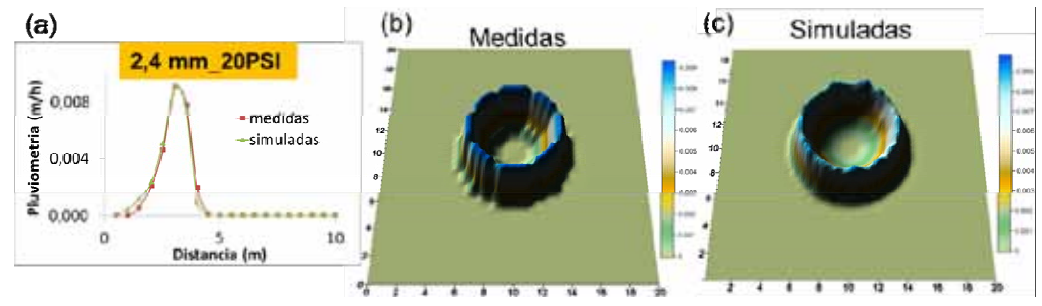
200A115

►►► En cuanto a los valores del error cuadrático medio ECM, éstos se incrementan con el tamaño de la boquilla, llegando a valores de  $2,5 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  para los tamaños mayores. Estos errores se pueden deber a que los ensayos fueron llevados a cabo en condiciones de campo en los que el viento nunca es cero.

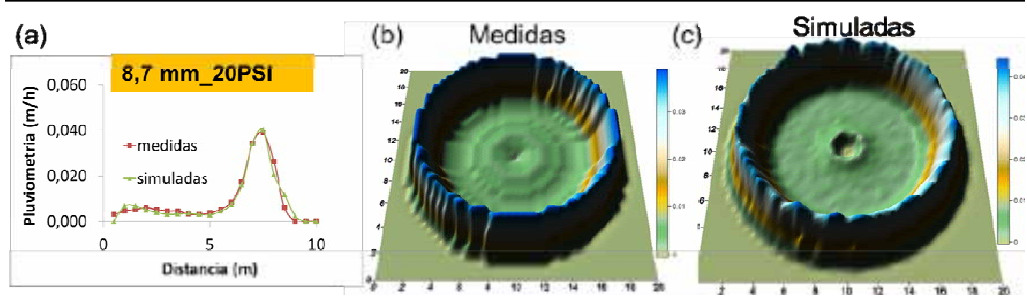
Las Figuras 7 y 8 presentan dos ejemplos de la pluviometría medida y simulada de un EPF con el diámetro más pequeño (2,4 mm) y el diámetro más grande (8,7 mm) trabajando a 20PSI, respectivamente. Se observa que el modelo reproduce muy bien el reparto de agua de los emisores evaluados experimentalmente.

La calibración de los parámetros  $K_1$  y  $K_2$  se realizó una vez calibrados los parámetros de distribución de los tamaños de gotas ( $D_{50}$  y  $n$ ). Los parámetros  $K_1$  y  $K_2$  no tienen un valor único y su valor óptimo depende de las condiciones de trabajo. Los resultados del coeficiente de correlación utilizados en el proceso de selección varían entre 0,50 y 0,94, alcanzando valores superiores, en general, para velocidades del viento más elevadas. Los valores de ECM oscilan entre  $1,03$  y  $12,47 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , alcanzando valores muy elevados para los tamaños de boquillas más grandes. Estos valores de correlación muestran la capacidad del modelo para simular y reproducir la distribución

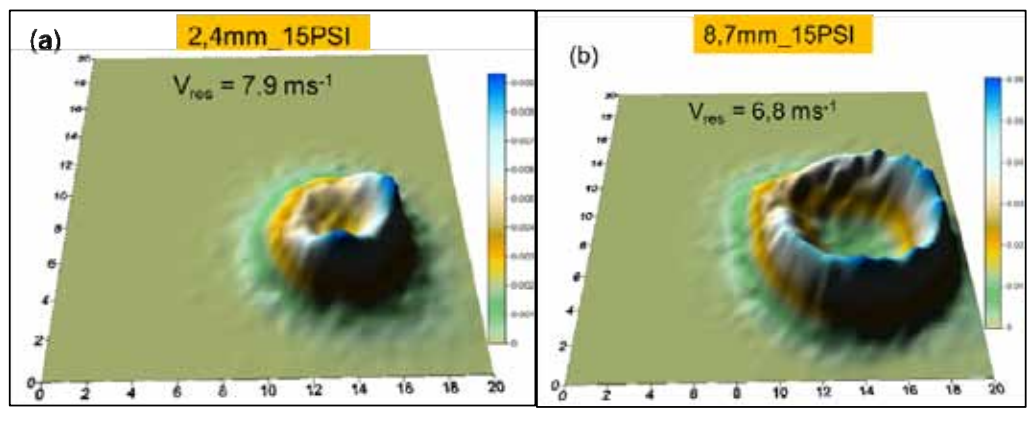
**Figura 7. Pluviometría radial medida y simulada (a) y el reparto de agua medido y simulado en 3 dimensiones (b y c) de un EPF con diámetro de 2,4 mm y trabajando a 20PSI.**



**Figura 8. Pluviometría radial medida y simulada (a) y el reparto de agua medido y simulado en 3 dimensiones (b y c) de un EPF con diámetro de 8,7 mm y trabajando a 20PSI.**



**Figura 9. Deformación de la distribución del agua por un viento fuerte de un EPF de diámetro de 2,4 mm (a) y un EPF de diámetro de 8,7 mm (a) trabajando a 15PSI.**



del agua en condiciones de viento medio y fuerte.

En la Figura 9, se presenta un ejemplo de la deformación de la distribución del agua originada por el viento con una velocidad resultante de  $7,9 \text{ ms}^{-1}$  y  $6,8 \text{ ms}^{-1}$  de un EPF de diámetro 2,4 mm (Figura 9a) y 8,7 mm (Figura 9b), respectivamente, trabajando a 15PSI.

#### 4- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo presenta la calibración del modelo balístico para reproducir el reparto de agua de emisores equipados con plato fijo. Las pérdidas de carga ►►►

►►► que ocasionan este tipo de platos deflectores se reducen con el incremento del tamaño del emisor, pasando del 80% para tamaños de boquilla pequeños (2 mm) hasta valores del 45% para tamaños de boquillas superiores a 5 mm. Los valores de pérdidas de carga en función del tamaño de la boquilla se han incorporado al modelo balístico para poder simular el reparto de agua de los emisores de plato fijo. El modelo calibrado reproduce los patrones de reparto de agua tanto en condiciones de viento en calma como en condiciones de viento de forma satisfactoria.

## 5- AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado con la ayuda financiera del Ministerio de Ciencia e Innovación mediante el proyecto AGL2010-21681 y la ayuda predoctoral de formación de personal investigador FPI-MICINN concedida al amparo de este proyecto al primer autor de este trabajo. Agradecemos la colaboración del personal del CITA-DGA, Miguel Izquierdo, Jesús Gaudó y Ricardo Santaolaria por su ayuda en las tareas de campo.

## 6-BIBLIOGRAFÍA

Carrión P., Tarjuelo J.M., Montero J., 2001. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. Description of model. *Irrigation Science* 20: 73-84.

Dechmi, F., E. Playán, J. Cavero, A. Martínez-Cob, and J.M. Faci. 2004. A coupled crop and solid set sprinkler simulation model: I. Model development. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, 130(6), 499-510.

Fukui Y., Nakanishi K., Okamura S., 1980. Computer evaluation of sprinkler irrigation uniformity. *Irrigation Science* 2: 23-32.

Kincaid, D.C., Solomon, K.H., Oliphant, J.C., 1996. Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Trans. ASAE*, 39(3), 839-845.

King B.A., Winward T.W., Bjorneberg D.L., 2010. Laser precipitation monitor for measurement of drop size and velocity of moving spray-plate sprinklers. *Applied Engineering in Agriculture*. 26(2): 263-271.

King, B.A., Bjorneberg, D.L., 2012. Droplet kinetic energy of moving spray-plate center-pivot irrigation sprinklers. *Transactions of the ASABE*. 55(2): 505-512.

Montero J., Tarjuelo J.M., Carrión P., 2001. SIRIAS: a simulation model for sprinkler irrigation. II Calibration and validation of the model. *Irrigation Science* 20: 85-98.

Omary M., Sumner H., 2001. Modeling water distribution for irrigation machine with small spray nozzles. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 127 (3): 156-160.

Playán E., Garrido S., Faci J.M., Galán A., 2004. Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine. *Agricultural Water Management* 70: 177-193.

Playán E., Zapata N., Faci J.M., Tolosa D., Lacueva J.L., Pelegrín J., Salvador R., Sánchez I., Lafita A., 2006. Assessing sprinkler irrigation uniformity using a ballistic simulation model. *Agricultural Water Management* 84: 86-100.

Salvador R., Bautista-Capetillo C., Burguete J., Zapata N., Playán E., 2009. A photographic methodology for drop characterization in agricultural sprinklers. *Irrigation Science* 27(4): 307-317.

Sánchez-Burillo G., Delirhasannia R., Playán E., Paniagua P., Latorre B., Burguete J., en prensa. Initial drop velocity in a fixed spray plate sprinkler. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*.

Seginer, I., Kantz, D., Nir D., 1991. The distortion by wind of the distribution patterns of single sprinklers. *Agric. Wat. Manag.* 19, 314-359.

Tarjuelo, J. M., Carrión. P., Valiente, M., 1994. Simulación de la distribución del riego por aspersión en condiciones de viento. *Inv. Agr. Prod. Prot. Veg.* 9(2), 255-272.

Vories, E. D., Von Bernuth, R. D., Mickelson, R. H., 1987. Simulating sprinkler performance in wind. *J. Irrig. Drain. Eng.* 113(1), 119-130.



**ITC**  
Tel. 935 443 040  
www.itc.es

# Dosificación de fertilizantes en pivots, coberturas y goteos

- Mayor producción de los cultivos
- Mayor rendimiento de los abonos
- Ahorro en costes de explotación
- Control de la fertilización

176EA117