



TRABAJOS TÉCNICOS  
AGUA

4

# Pautas de mejora para riego por aspersión

Federico Aimar<sup>1,2</sup>, Roberto Paulo Marano<sup>3</sup>, Aquiles Salinas<sup>1</sup>, Juan Pablo Giubergia<sup>1,2</sup>, Ignacio Severina<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Manfredi, Ruta Nac. 9, km 636, Manfredi, Córdoba.

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba (UNC), Av. Ing. Agr. Felix Aldo Marrone 746, Córdoba.

<sup>3</sup>Instituto de Ciencias Agropecuarias del Litoral (ICIAgro Litoral), Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ciencias Agrarias Esperanza, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) Kreder 2805, Esperanza, Santa Fe.

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Villa María (UNVM), Arturo Jauretche 1555, Villa María, Córdoba.

rmarano@fca.unl.edu.ar, salinas.aquiles@inta.gov.ar, giubergia.juan@inta.gov.ar, severina.ignacio@inta.gov.ar, aimar.federico@inta.gov.ar

“Este trabajo fue previamente publicado en Agronomy”.

AIMAR, F.; MARTÍNEZ-ROMERO, Á.; SALINAS, A.; GIUBERGIA, J.P.; SEVERINA, I.; MARANO, R.P. (2022). A Revised Equation of Water Application Efficiency in a Center Pivot System Used in Crop Rotation in No Tillage. *Agronomy*, 12(11), 2842. <https://doi.org/10.3390/agronomy12112842>

## RESUMEN

Las competencias por el uso del agua, recurso limitado, conllevan a un uso cada vez más racional de esta. Los aportes en términos de eficiencia que se realice sobre la agricultura de regadío, principal consumidor, requieren de un sustento de conocimiento científico para la optimización de estas prácticas.

El estudio fue conducido en la Estación Experimental del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, ubicado en la región central de la provincia de Córdoba durante la campaña 2016/2017. El objetivo de este trabajo fue contribuir a la mejora en el uso del agua para riego con pivote central a partir de la cuantificación de las pérdidas. Se propuso una ecuación general de eficiencia de aplicación, la cual se validó, modificó y se sugieren la incorporación de componentes para ser adaptada a las condiciones propias de la región de estudio.

La uniformidad de distribución (UD) y su comportamiento relacionado con el cultivo de maíz fue de un 90 % en los estadios vegetativos iniciales (V6), alcanzando UD de 20 % en estadios reproductivos. En esta fase del cultivo, el coeficiente de uniformidad del suelo (CUs) alcanzó valores mayores al 90 % debido a un efecto de redistribución del agua en el estrato de 0-10 cm.

En referencia a las pérdidas de agua relacionadas con la retención del residuo vegetal (PSR) se determinaron valores de hasta 3mm relacionados con la dosis de riego y con las cantidades de materia seca presentes en el rastrojo.

Se generó una ecuación de ajuste para determinar las pérdidas por interceptación foliar (InF) en los diferentes estadios del cultivo y con distintas dosis de riego.

Los componentes de pérdidas sugeridos a incorporar (PSR y InF) y las modificaciones sobre los componentes existentes en la ecuación de eficiencia de aplicación general permitieron generar una nueva fórmula adaptada a sistemas de producción en siembra directa continua bajo riego por pivote central en la región Pampeana semiárida.

**Palabras clave:** riego, eficiencia de aplicación, uniformidad de distribución, retención hídrica del residuo vegetal e interceptación foliar.

## INTRODUCCIÓN

Dentro de las herramientas para optimizar el uso del agua se incluyen sistemas de riego presurizados que, a pesar de las posibilidades de automatización, requieren de un mantenimiento y de una operación adecuados para el correcto funcionamiento agronómico e hidráulico, por lo que, con la finalidad de detectar fallas de manera oportuna para su solución, su evaluación debe ser un procedimiento para tener en cuenta (Román *et al.*, 2005).

Las herramientas potenciales de manejo para el uso eficiente del agua y sus nutrientes incluyen el uso de sistemas de riego de precisión, aunque la tecnificación del riego no implica que se alcancen altas eficiencias si estos sistemas no se operan adecuadamente bajo las premisas de su diseño.

Las máquinas de riego por aspersión autopropulsados han experimentado un gran éxito a nivel mundial. Principalmente por sus ventajas: 1) alto potencial de uniformidad y eficiencia de aplicación; 2) alto grado de automatización y 3) capacidad para aplicar agua y nutrientes en un amplio rango de suelos, cultivos y condiciones topográficas.

La eficiencia de aplicación (Efpa) está fuertemente relacionada con la uniformidad de distribución del agua y con el método de riego elegido (Hsiao *et al.*, 2017). En riego por aspersión los factores más importantes que definen la Efpa son (Keller y Bliesner, 1990; Tarjuelo 1995; Lamm *et al.*, 2019): a) la uniformidad de distribución sobre la superficie irrigada; b) las pérdidas producidas por el arrastre y deriva de las gotas asperjadas –junto con su forma y tamaño– influenciadas por las condiciones ambientales (radiación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento); a) y b) dependen en gran medida, tanto de las características de los emisores utilizados, posición en relación con el dosel del cultivo (dentro o sobre el cultivo) y presión de trabajo, como de las condiciones climáticas en las que se produce el riego (especialmente la velocidad del viento); c) la evaporación, ya sea desde el suelo o desde la planta; e) la arquitectura foliar de los distintos cultivos y d) características del suelo (infiltración, cantidad y composición de los residuos de cosecha y grado de pendiente).

La ecuación de Keller y Bliesner (1990) es una de la más difundidas para estimar la Efpa en sistemas estacionarios (solid set), pero menos utilizada en pivote central (Fernández *et al.*,

2020) y tiene en cuenta los siguientes componentes: a) Pérdidas relacionadas con fugas y roturas en las tuberías del sistema; b) Uniformidad de Distribución (UDpa), para un porcentaje de área adecuadamente bien regada (pa) y c) Pérdidas por evaporación y deriva de las gotas asperjadas. Pero no contempla las pérdidas por intercepción del follaje ni retención por el rastrojo.

La intercepción del agua aplicada con riego está influenciada por los cultivos, determinando el modo en que el agua llega al suelo, según sean erectófilos o planófilos (Quinn y Laffen, 1983; Montazar y Sadeghi, 2008). También incide el modelo de reparto del agua, la separación de los aspersores y distancia respecto al dosel (Tolk *et al.*, 1995). A su vez, el agua aplicada puede alcanzar directamente el suelo, escurrir a través del tallo o almacenarse temporalmente en la superficie del propio cultivo y posteriormente evaporarse (Lamm y Manges, 2000).

En Argentina la siembra directa es un sistema de producción ampliamente utilizado (Buschiazzo *et al.*, 1998; Díaz Zorita *et al.*, 2002). Los principales cultivos que aportan residuos son trigo, maíz y soja (Giubergia *et al.*, 2013), teniendo la densidad de los tejidos un importante rol en la retención y transporte de agua (Iqbal *et al.*, 2012). No existe unanimidad en la bibliografía para indicar el proceso de acumulación de agua en el rastrojo, siendo denominado "retention" (Thapa *et al.*, 2021) o "interception" (Savabi y Stott, 1994). Estos autores indicaron que el residuo de trigo retiene significativamente mayor cantidad de agua de lluvia que los residuos de maíz y soja. La máxima retención hídrica en el residuo vegetal disminuye con el aumento de descomposición, efecto fuertemente asociado a la concentración de lignina del residuo (Thapa *et al.*, 2021). A pesar de su importancia en el balance, la influencia de los residuos de cosecha en la retención de agua no está incorporado a una ecuación de eficiencia de riego por aspersión.

Quantificar correctamente la pérdida de agua en pivote central es importante para determinar la dosis bruta y mejorar la gestión y eficiencia del riego, especialmente donde el agua es un recurso escaso o de elevado costo. Por tanto, el objetivo del presente trabajo es proponer criterios de evaluación de equipos de pivote central en cultivos con siembra directa, donde se incluyen procedimientos de campo y ecuaciones de eficiencia de aplicación.

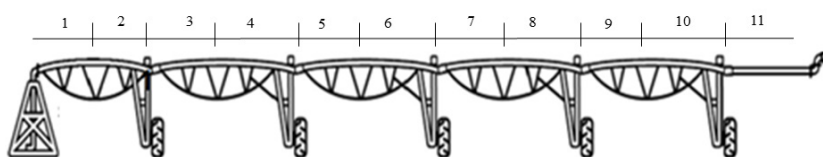
## MATERIALES Y MÉTODOS

### Uniformidad y eficiencia de aplicación. Generalidades

Dado que el pivote tiene emisores con caudales crecientes desde el centro hacia el extremo y con diferentes intensidades de aplicación que pueden influir en la uniformidad del equipo, se recomienda agrupar los emisores de los diferentes tramos. Para ello se utiliza la carta de aspersores entregada por la empresa que instaló el equipo, considerando que el coeficiente de variación de caudales de los emisores sea entre 3 y 11 %, denominando "segmentos" a este agrupamiento (figura 1). Se los identifica y, en condiciones de campo y sin viento, se determina ancho y largo de mojado, considerándose ancho de mojado a la distancia en la cual llegan las gotas en la porción central de un determinado segmento. Prueba efectuada con el equipo aplicando agua, pero sin avanzar. El largo de mojado se determina como la suma de las distancias entre los aspersores incluidos en cada segmento. También se determinan los tiempos de mojado que corresponden a cada ancho de mojado, utilizando al menos tres porcentajes de avance (100, 50 y 25).

Se recomienda verificar el caudal teórico de los aspersores mediante caudalímetros mecánicos ubicados aguas arriba del regulador de presión (figura 2), dado que para su correcto

**Figura 1.** Equipo de riego utilizado y disposición de segmentos a lo largo de este.



**Figura 2.** Hidrómetros utilizados en la determinación de los caudales de cada aspersor.



funcionamiento necesita un tramo recto sin turbulencia. Esta medición se realiza, una vez instalado el equipo, en cada aspersor y se repite por triplicado durante veinte minutos. Se toma la lectura antes y después de cada medición para conocer el volumen aplicado.

Para la disposición de los colectores se utilizan las normas de American National Standards Institute y de American Society of Agricultural Engineers (ANSI/ASAE, 2001), que indican las medidas y separación de los colectores. En Argentina no existe una empresa proveedora de colectores estandarizados, por lo que en cada región deben encontrarse recipientes que se asemejen a los propuestos por las normas anteriores. El diámetro y el largo mínimos deben ser 60 mm y 120 mm respectivamente.

### Ecuaciones involucradas en la eficiencia de aplicación

La ecuación original de trabajo propuesta para evaluar la eficiencia de aplicación, en equipos de riego por aspersión estacionarios corresponde a la ecuación 1 (Keller y Bliesner, 1990):

$$E_{fpa} = O_e \times R_e \times UDpa \quad \text{Ec (1)}$$

Donde  $O_e$ : pérdidas originadas por fugas en las tuberías, que se consideraron igual a 1 en este trabajo;  $R_e$ : pérdidas por evaporación y arrastre de las gotas;  $UDpa$ : Uniformidad de distribución para la fracción de área adecuadamente bien regada; siendo todos estos componentes adimensionales.

Las ecuaciones utilizadas para el cálculo de cada uno de los componentes de  $E_{fpa}$  fueron (Keller y Bliesner, 1990):

$$R_e = 0.976 + 0.005 * ETo - 0.00017 * ETo^2 + 0.0012 * WS - CI * (0.00043 * ETo + 0.00018 * WS + 0.000016 * ETo * WS) \quad \text{Ec (2)}$$

Donde  $ETo$ : Evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ );  $WS$ : Velocidad del viento ( $\text{m s}^{-1}$ );  $CI$ : Índice de pulverización.

Los registros climáticos se obtuvieron en una estación meteorológica ubicada a 1000 m del equipo de riego, con una frecuencia de registro de 5 minutos. Para la determinación de  $R_e$  el pivote funcionó en horario diurno, sin cultivo y aplicando cuatro dosis (38, 24, 12 y 7 mm). Para  $ETo$  se utilizó la ecuación de FAO (Allen *et al.*, 1998) estimando los valores promedios o acumulados correspondientes a cada evento de riego.

La determinación del índice de pulverización ( $CI$ ) se hizo mediante la ecuación:

$$CI = 0.032 * \frac{Pa^{1/3}}{db} \quad \text{Ec (3)}$$

Donde  $Pa$ : Presión de trabajo del aspersor (kPa);  $db$ : diámetro de boquilla (mm). La  $Ec 3$  es válida para  $7 \leq CI \leq 15$ ; si  $CI < 7$ , entonces  $CI = 7$ ; si  $CI > 15$ , entonces  $CI = 15$ . La presión de trabajo utilizada fue dada por los reguladores de presión de cada aspersor.

La uniformidad de distribución para la fracción de área bien regada ( $UDpa$ ) se estimó:

$$UDpa = 100 + (606 - 24,9 * pa + 0,349 * pa^2 - 0,00186 * pa^3) \left(1 - \frac{CUC}{100}\right) \quad \text{Ec (4)}$$

Donde  $Pa$ : fracción de área bien regada;  $CUC$ : Coeficiente de Uniformidad de Christiansen (1942).

En el presente trabajo se sugiere reemplazar el  $CUC$  por el Coeficiente de Uniformidad de Heermann y Hein ( $CUHyH$ ), dado que este indicador de uniformidad es específico para pivote central:

$$CUHyH = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{D_i - M_c}{C_i}\right)^2}{\sum_{i=1}^n C_i D_i}\right) * 100$$

$Ec (5)$

Donde  $n$ : número de colectores;  $C_i$ : cantidad de agua recolectada (mm);  $D_i$ : distancia del centro del pivote al colector  $i$  (m);  $M_c$ : media ponderada de la cantidad recogida por los  $n$  colectores (mm).

Como novedad, a la ecuación original de Keller Bliesner ( $Ec 1$ ) se le incorpo-

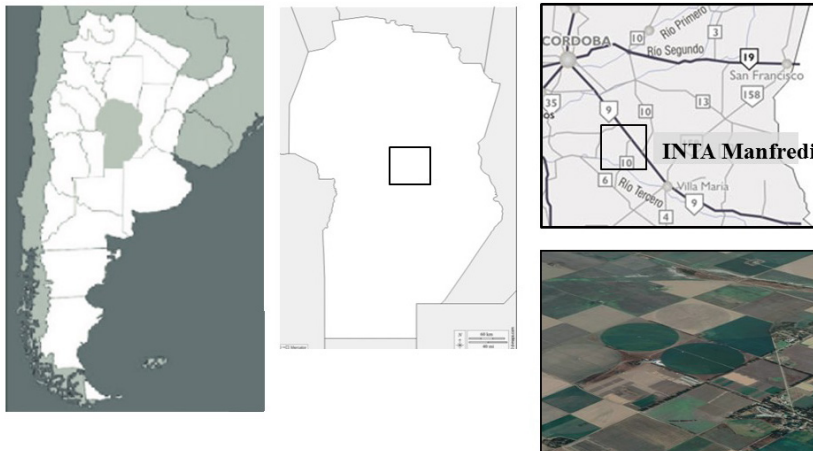
raron los componentes de Retención del residuo Vegetal (RR) e Interceptación Foliar (LI).

### Estudio de caso EEA INTA Manfredi

Para avalar tanto el procedimiento de campo como las ecuaciones propuestas, se realizaron mediciones en el predio experimental de EEA INTA Manfredi ( $31^\circ 49'$  de latitud S y  $63^\circ 46'$  de longitud O, figura 3), sobre un ensayo de larga duración de cultivos agrícolas (desde 1996 hasta el presente), con una rotación bianual trigo/soja  $2^\circ$  y maíz  $1^\circ$  utilizando un sistema de siembra directa. Se utilizó un equipo de pivote central de la firma comercial Lindsay con cinco tramos de 52 m más un voladizo de 42 m, que irriga 27.8 ha. El equipo dispone de 110 aspersores I Wob UP3 (Senninger), con separaciones de entre 1.90 y 5.70 m, ubicados a 1.60 m del suelo, con reguladores de presión individuales (15 PSI). La dosis bruta aplicada en un riego al 100 % de su velocidad es de 7 mm. El caudal de bombeo es de  $132 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$  (dotación de  $1.32 \text{ L s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ ) y la fuente de agua para riego es de origen subterráneo, cuyas principales características son: i) valores de conductividad eléctrica y sales disueltas totales de  $1.07 \text{ dS m}^{-1}$  y  $683 \text{ mg L}^{-1}$  respectivamente; ii) Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y RAS ajustado según Ayers y Westcot (1989) de 7.5 y 7.9 respectivamente.

Para determinar la uniformidad del riego y pérdidas por interceptación, se realizaron mediciones en un cultivo de maíz. El maíz (*Zea mays*) fue sembrado el 06/10/2016 sobre un residuo de soja, con una distancia entre hileras de 0.52 m y con una densidad de 4.2 plantas por metro lineal. Se utilizaron colectores de 110 mm de diámetro y 220 mm de largo desde la base hasta el bisel, ubicándose en el centro del interfilar del cultivo, a una altura desde el suelo de 0.5 m y distanciados a 3 m entre sí (figura 4a). Los colectores se dispusieron radialmente a lo largo del equipo de riego, con el primero a una distancia de 20 m del centro del pivote, logrando evaluar más del 99 % de la superficie regada. Se utilizaron entre 8 y 15 colectores, de acuerdo a la longitud de cada segmento.

También se evaluó el equipo sin cultivo, considerando esta situación como testigo (figura 4b) y, para evaluar las pérdidas por evaporación directa, se colocaron tres colectores a una distancia de 100 m del final del equipo, siendo medidos los volúmenes evaporados durante el tiempo de aplicación de las distintas dosis empleadas.

**Figura 3.** Ubicación Estación Experimental INTA Manfredi.

### Momentos de evaluación y posición de aspersores

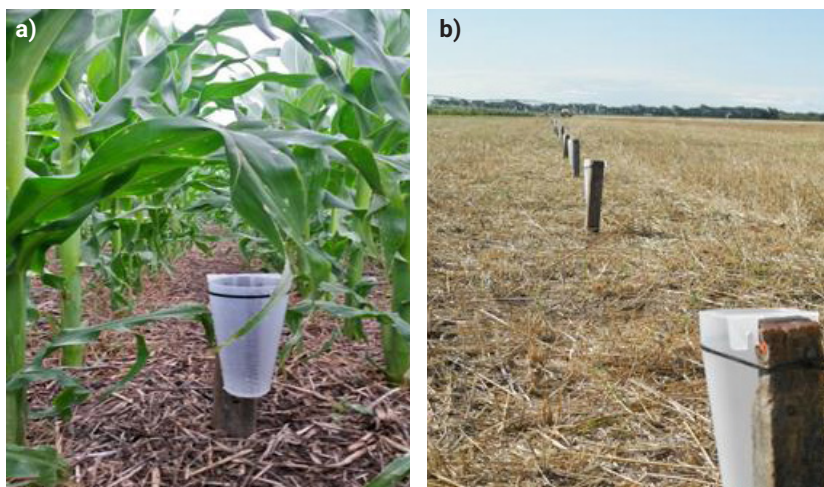
Por un lado, se evaluaron cuatro dosis de riego (38, 24, 12 y 7 mm) en el testigo y en tres estados de desarrollo vegetativo ( $V_4$ ,  $V_6$  y  $V_{10}$ ), siguiendo la escala propuesta por Ritchie y Hanway (1982), que corresponden a diferentes alturas del cultivo. Cuando el maíz alcanzó el estado reproductivo ( $R_1$ , 2,8 m altura del cultivo), se evaluaron dos condiciones y con una única dosis (38 mm): una condición fue con los emisores en el interior de la canopeo (1.6 m del suelo) y la otra con los aspersores elevados por encima del dosel (3 m en relación con el suelo) (tabla 1). Por otro lado, se puede corroborar el posible efecto que tendría la separación entre aspersores en relación con la uniformidad, relacionando para cada segmento valores medios de la separación entre aspersores y con los

valores promedios de UDpa para las cuatro dosis aplicadas, considerándose cuatro condiciones: i) testigo; ii) estado vegetativo; iii) estado reproductivo con aspersores introducidos en el cultivo ( $R, In$ ) y iv) estado reproductivo con aspersores elevados ( $R, El$ ).

### Rendimiento en función de la Uniformidad de Distribución

Para relacionar la productividad del cultivo de maíz con UDpa en cada uno de los segmentos, se seleccionaron 3 parcelas de 25 m<sup>2</sup> (210 plantas aproximadamente) distribuidas a su vez en tres áreas o ejes del equipo, teniendo en cuenta la homogeneidad del suelo, totalizando 33 parcelas (figura 5). A madurez fisiológica se cosecharon todas las espigas, se trillaron y colocaron los granos en estufa hasta peso constante, corrigiendo el valor de humedad comercial (14.5 %).

**Figura 4.** a) Ubicación de colectores en el interfilas del cultivo de maíz (izquierda) y b) colectores en la condición Testigosin cultivo (derecha).



### Retención hídrica en el rastrojo

Para determinar la componente de pérdida de riego debida al rastrojo (PSR), se evaluaron los residuos de la rotación, identificando tres sitios en el área central de cada segmento. En estos sitios se insertaron cuadrados metálicos (0.25 m<sup>2</sup>) dentro de los cuales se recortó y extrajo el rastrojo (figura 6). Se aplicaron cuatro dosis brutas (7, 12, 24 y 38 mm) con los aspersores a 1.6 m de altura, recolectando el rastrojo antes y después de cada riego. Para determinar los contenidos hídricos inicial y final, las muestras obtenidas se pesaron y colocaron en estufa a 60 °C hasta peso constante.

Se consideraron: i) retención inicial (RI) al contenido de agua del rastrojo previo al riego; ii) retención parcial del rastrojo (PSR) a la cantidad aportada exclusivamente por el riego y iii) retención total (RT) a la suma de las dos anteriores.

### Interceptación foliar y redistribución de agua en el suelo

Para determinar las componentes de la interceptación foliar se adaptaron las ecuaciones de Lamm y Manges (2000) para aspersor giratorio y de baja presión, considerando : Throughfall, trascolación (mm) y : Stemflow, flujo a través del tallo (mm). Para determinar  $T_a$  se utilizaron dos procedimientos con el cultivo en  $R_1$  (tabla 1): i) se analizaron los datos de los colectores con cuatro dosis de riego (7, 12, 24 38 mm); ii) se realizaron mediciones de agua en el suelo (entrelínea, AEL), con una dosis de 38 mm. Para ello se utilizó una sonda portátil TDR, con una profundidad de medición de 0.10 m, disponiendo de una grilla de lecturas cada 0.10 m, tanto en la línea del cultivo como en la entrelínea. La grilla de mediciones fue dispuesta en tres sitios por segmento del equipo de pivote, siendo efectuada antes (50 % de agua útil) y 36 h después de la aplicación del riego.

Las lecturas obtenidas en los colectores y el agua infiltrada en la entre línea (AEL) fueron correlacionadas con  $T_a$ . En tanto el agua infiltrada en la línea del cultivo (AL) fue considerada como la fracción de agua interceptada y conducida por el tallo hacia la base de la planta ( $S_a$ ).

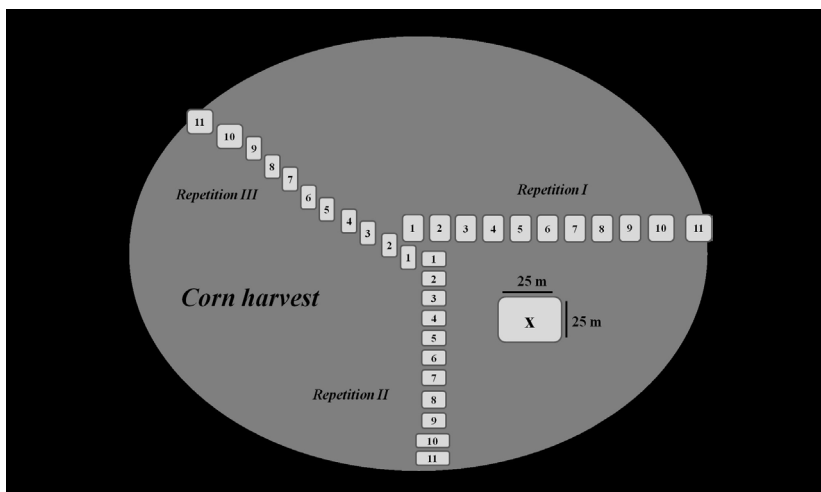
A su vez,  $S_a$  puede considerarse equivalente a la lámina interceptada, obtenida como la diferencia entre la dosis aplicada y la lámina colectada (LC). No se tuvo en cuenta el componente de evaporación desde el follaje, dadas las características de la hoja de maíz (Thompson et al., 1996).

**Tabla 1.** Dosis evaluadas en relación al estado fenológico-alturas del cultivo y posición de los aspersores.

	Velocidad %	15	25	50	100		
	Dosis bruta (mm)	40	24	12	6		
		Número de mediciones				Altura cultivo (m)	Altura aspersor (m)
	Testigo	3	3	3	3	-	
*Estado fenológico	V <sub>4</sub>	1	1	1	1	1.2	1.6
	V <sub>6</sub>	1	1	1	1	1.4	
	V <sub>10</sub>	1	1	1	1	1.55	
	R <sub>1</sub> IN	3	-	-	-	2.8	
	R <sub>1</sub> EL	3	2.8	3	-	-	

\*Estado fenológico del maíz (Ritchie y Hanway, 1982); V<sub>4</sub>: cuatro hojas completamente desplegadas; V<sub>6</sub>: seis hojas completamente desplegadas; V<sub>10</sub>: diez hojas completamente desplegadas; R<sub>1</sub> IN: floración femenina, emergencia de estigmas y aspersores dentro del cultivo (1.60 m); R<sub>1</sub> EL: floración femenina, emergencia de estigmas y aspersores elevados por sobre el cultivo (3.20 m). Número de colectores: 94.

**Figura 5.** Distribución de las parcelas cosechadas de maíz (25 m por 25 m) dentro del círculo de riego.



**Figura 6.** Cuadrícula metálica de 0.25 m<sup>2</sup>, utilizada para realizar el muestreo y operario, cortando el residuo vegetal.



Se realizaron regresiones que incluyeron diferentes alturas del cultivo (1,20; 1,40; 1,55 y 2,80 m), considerando una distancia (H) expresada como la diferencia entre la parte superior del canopeo (última hoja desplegada) y el colector Ec 6.

$$H = h_a - (h_p - h_c) \quad \text{Ec (6)}$$

Donde H: altura obtenida a partir de la distancia vertical entre la posición del aspersor respecto a la superficie del suelo y a la altura del colector (m); altura del aspersor respecto a la superficie del suelo (m); altura de la planta, considerándose a esta desde el suelo hasta la base del tallo donde se inserta la última hoja desplegada (m); altura del colector desde el suelo hasta el bisel (0.50 m).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Caudal y pluviometría de los segmentos

Se presentan los caudales medidos (reales) y el CV de los once segmentos determinados en el pivote central de la EEA Manfredi (tabla 2). El CV debe ser menor a 10 % para considerar que la pluviometría media no presenta grandes variaciones.

Del mismo modo, la tabla 3 presenta el ancho de mojado creciente en los segmentos iniciales (1 a 3), alcanzando valores entre 14 y 15 m en los segmentos finales (tabla 3). El índice de pulverización (CI) fue creciente en función del diámetro de boquilla, dado que la presión manométrica fue constante en todos los segmentos (15 PSI). La pluviometría se fue incrementando de 5 a 77 mm h<sup>-1</sup> en los segmentos sucesivos (tabla 3), lo cual permitió representar los cambios de pluviometría a lo largo del equipo.

### Uniformidad de Distribución (UD) y el porcentaje de área regada adecuadamente (pa)

Por un lado, la condición testigo indica el modelo del reparto de agua sin cultivo y puede ser comparada con los resultados de uniformidad alcanzados en presencia de un determinado cultivo. Por otro lado, la ecuación de UDpa conceptualmente significa que, para un determinado valor de pa, el déficit entre la dosis neta deseada y la dosis efectivamente almacenada en el suelo

**Tabla 2.** Caudales promedios teóricos y actuales  $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$  para cada segmento y su correspondiente coeficiente de variación (CV).

Segmentos	Flow design		Flow actual		Relation actual flow/ design flow
	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	C.V	$\text{m}^3 \text{h}^{-1}$	C.V	
1	0.27	36.16	0.3	44.47	1.11
2	0.63	16.89	0.72	17.91	1.14
3	1.08	11.48	1.28	12.16	1.19
4	0.77	12.33	0.91	10.29	1.18
5	1.08	11.74	1.27	11.74	1.18
6	1.4	7.28	1.63	7.28	1.16
7	1.59	4.87	1.87	4.87	1.18
8	1.72	4.76	1.99	4.76	1.16
9	2.00	4.18	2.21	4.18	1.11
10	2.00	5.08	2.21	5.08	1.11
11	2.04	15.75	2.14	4.35	1.05

**Tabla 3.** Ancho, largo, pluviometría, tiempo de mojado e índice de pulverización para los distintos segmentos del equipo de riego y cuatro velocidades de avance (%).

Segmentos	Ancho mojado m	Longitud segmento m	Pluviometría media $\text{mm h}^{-1}$	CI	Velocidad de avance			
					100 %	50 %	25 %	15 %
					Tiempo para recorrer ancho mojado (minutos)			
1	8.7	24.1	5.7	0.18	51	98	349	482
	11.2	26.8	12.0	0.28	36	58	142	193
3	14.5	34.2	15.4	0.37	17	32	65	111
4	13.7	23.9	25.0	0.31	19	32	74	108
5	14.3	55.2	32.1	0.37	14	25	56	83
6	14.3	25.9	39.6	0.42	10	17	42	52
7	14.5	29.4	48.3	0.45	8	15	30	55
8	14.5	24.6	50.2	0.47	8	14	34	47
9	14.7	23.9	56.7	0.51	7	13	32	41
10	14.5	17.3	79.4	0.52	7	11	25	43
11	15.1	12.3	77.4	0.46	5	8	17	31

Donde: CI, índice de pulverización, adimensional.

es mayor cuando disminuye CUHyH (Keller y Bliesner, 1990). Es decir, si la uniformidad es baja, hay que aplicar una dosis mayor. Con un valor de pa de 80 %, UDpa es semejante a CUHyH, indicando la superficie adecuadamente bien regada más apropiada. No obstante, es posible utilizar valores de pa menores, pero a sabiendas de que dispondremos de una proporción de superficie subirrigada mayor y ello depende tanto de la sensibilidad al déficit hídrico como del valor económico del cultivo utilizado (Lecina, 2014).

### Uniformidad de Distribución en testigo

Los resultados de UDpa para la condición testigo y pa 80 % (tabla 4) pueden calificarse como buenos a muy buenos para las cuatro dosis de riego analizadas (ANSI/ASAE, 2001). A su vez, los valores medios de UDpa calculados con valores de pa distintos a 80 % difieren de los promedios de CUHyH (tabla 4), en coincidencia con la ecuación propuesta por Keller y Bliesner (1990), donde varían según sean mayores o menores los valores de pa. Con los resultados obtenidos, la ecuación de UDpa plantea-

da por Keller y Bliesner (1990) pudo ser adaptada utilizando CUHyH, en vez de la ecuación de Christiansen.

### Uniformidad de Distribución en estados vegetativos

Al alcanzar el cultivo una altura de 1.20 m ( $V_{4r}$ , figura 7 b) comenzó una interferencia del agua aplicada (0.5 % a un 10 % de disminución de UDpa) respecto al testigo, considerando todas las dosis aplicadas y todos los segmentos. Con el cultivo a 1.40 m de altura ( $V_{6r}$ ) continuó disminuyendo UDpa hasta valores entre 60 % a 70 %, siendo estos valores de uniformidad (hasta 60 %) considerados aceptables para el riego sobre el cultivo de maíz, según Merriam y Keller (1979). Con los aspersores próximos a introducirse dentro del cultivo ( $V_{10r}$ , 1,55 m) se acentuó la disminución de UDpa con respecto al testigo, alcanzando valores entre 20 % y 40 % (figura 7d).

### Uniformidad de Distribución en estados reproductivos

Con 2,80 m de altura del cultivo de maíz ( $R_1$ ) se obtuvieron valores de UDpa con dos condiciones de funcionamiento, aspersores a 1,60 m ( $R_{1IN}$ , debajo de la canopia) y a 3 m del suelo ( $R_{1EL}$ , por encima de la canopia). Para la primera condición se alcanzaron UDpa entre 50 % y 30 % (figura 7e), la mayor disminución de todos los test; en tanto la elevación de los aspersores mejoró UDpa, logrando valores promedios del 60 % de UDpa (figura 7f).

Se compararon estadísticamente los resultados de UDpa, según las dosis aplicadas (velocidades) y crecimiento del maíz (estados fenológicos). Estos resultados indican que, con el crecimiento del maíz, las mayores dosis, láminas más pesadas, tuvieron mejor comportamiento en relación con la uniformidad, lo que es un criterio de manejo del riego para tener en cuenta.

### Uniformidad y separación de aspersores

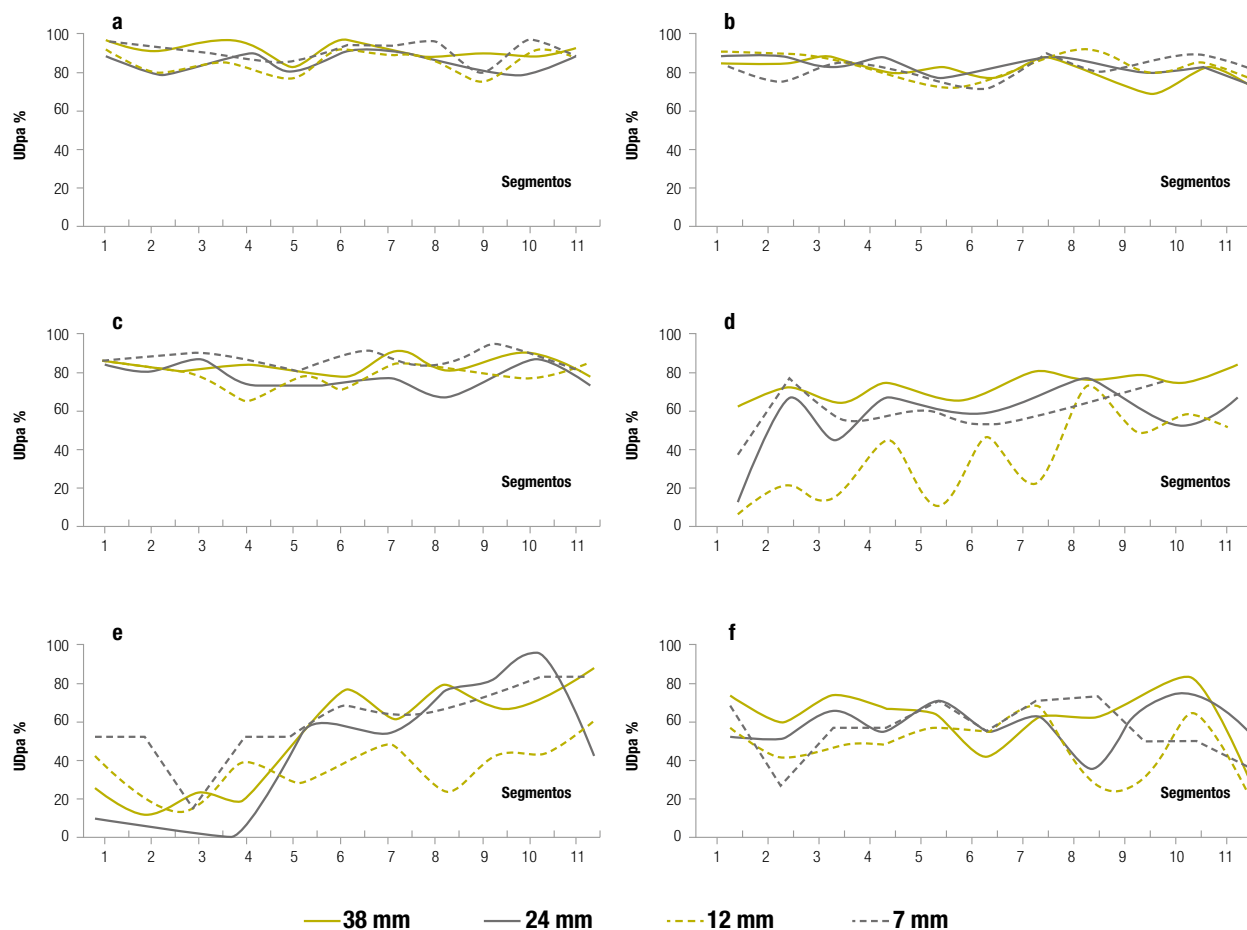
Hubo una disminución de UDpa en los estadios vegetativo y  $R_{1EL}$  respecto al testigo, que fue similar para todos los espaciamientos (figura 8). Por el contrario, en  $R_{1IN}$  hubo una disminución abrupta de UDpa con espaciamientos entre 5 y 5.1 m (figura 7). La mayor disminución de UDpa ocurrió en los primeros segmentos, donde la separación entre los aspersores fue mayor. En esta situación, con una separación de 5.2 m y el maíz

**Tabla 4.** Promedio de CUHyH y de UDpa de las cuatro dosis utilizadas en la condición testigo.

1	Segmentos											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
pa	CUHyH (%)	93.6	86.9	89.4	88.9	83.0	93.4	91.5	85.2	83.3	88.7	86.1
70		96.8	91.5	93.1	92.8	89.0	95.7	94.5	90.4	89.2	92.6	91.0
75		94.1	89.1	91.2	90.7	85.9	94.5	92.9	87.7	86.1	90.6	88.5
80	UDpa (%)	93.4	86.3	88.9	88.3	82.2	93.1	91.1	84.5	82.5	88.1	85.5
85		92.5	82.8	86.0	85.4	77.7	91.3	88.8	80.6	78.1	85.1	81.8
90		91.5	78.5	82.5	81.7	72.2	89.1	86.0	75.7	72.6	81.4	77.2

Donde: CUHyH, Coeficiente de Uniformidad de Hermann y Hein; UDpa, Uniformidad de Distribución y pa, porcentaje de área bien regada.

**Figura 7.** Uniformidad de Distribución (UDpa) de los distintos segmentos con aspersores a 1.6 m del suelo y pa 80 % para: a) condición testigo; b) maíz en  $V_4$  a 1.2 m de altura; c) maíz en  $V_6$  a 1.4 m de altura; d) maíz en  $V_{10}$  a 1.55 m de altura; e) maíz en su máxima expansión foliar ( $R_1$ ), altura promedio de 2.8 m; f) maíz en  $R_1$  (2.8 m de altura), pero con aspersores elevados por encima de la canopia (3 m). Interlineado gris 15 % (40 mm), línea entera negra 25 % (24 mm), línea entera gris 50 % (12 mm), interlineado negro 100 % (6 mm).



sembrado a 0.52 m entre hileras, existen 10 líneas de cultivo o 20 plantas de maíz (densidad de siembra de 4.2 plantas por metro lineal) que se interpusieron a la trayectoria de las gotas, ocasionando una alta interferencia (Lamm *et al.*, 2019 y Martín, 2017). Observando las curvas

que representan los distintos estados fenológicos del cultivo vs. testigo, la separación óptima entre aspersores es 2.5 m (figura 8).

La distancia entre los aspersores y el dosel del cultivo tuvo impacto sobre la uniformidad, dado que UDpa se redujo

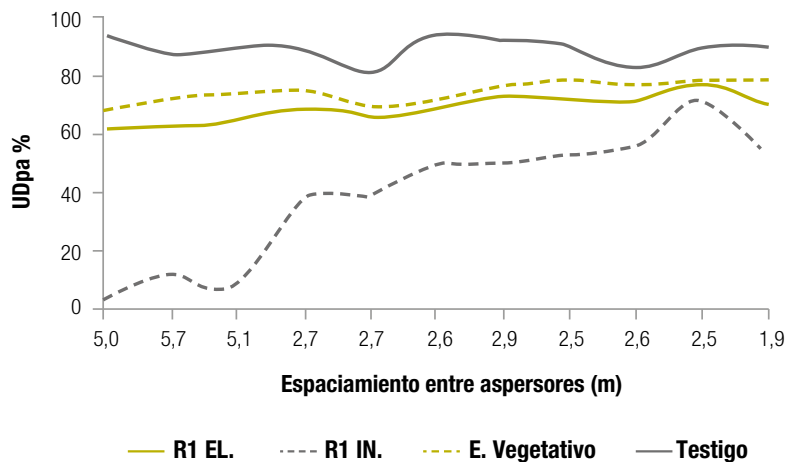
significativamente ( $P \leq 0.05$ ) a partir de  $V_6$  y con todas las dosis aplicadas (tabla 5). Esto se explica por la interferencia de las plantas en la trayectoria de las gotas, que no permite una adecuada superposición en tanto haya una menor distancia entre el dosel y el aspersor (Tolk *et al.*, 1995).

**Tabla 5.** Uniformidad de distribución (UDpa) promedio de todos los segmentos considerando las distintas dosis en cada uno de los estados fenológicos y condición testigo.

Phenologica l state	Forward speeds							
	15 %		25 %		50 %		100 %	
	UDpa							
	Average	C.V.	Average	C.V.	Average	C.V.	Average	C.V.
Testigo	0,90 C b	13,3	0,91 C b	15,7	0,85 C b	20,1	0,85 V b	11,8
V <sub>4</sub>	0,84 C a	6,9	0,82 C a	7,6	0,84 C a	6,0	0,84 C a	8,1
V <sub>6</sub>	0,84 C c	4,5	0,81 C cb	5,3	0,76 C ab	7,8	0,76 C ab	7,5
V <sub>10</sub>	0,70 B b	16,3	0,59 B ab	32,8	0,59 B ab	27,3	0,45 B a	56,6
R <sub>1</sub> EL	0,66 B b	26,3	0,65 B b	22,8	0,65 B b	18,1	0,60 B a	31,4
R <sub>1</sub> IN	0,51 A b	56,8	0,46 A ab	72,6	0,40 A ab	87,5	0,32 A a	166,4

Testigo: sector del círculo de riego sin cultivo; V<sub>4</sub>: estado vegetativo con cuatro hojas completamente desplegadas; V<sub>6</sub>: estado vegetativo con seis hojas completamente desplegadas; V<sub>10</sub>: estado vegetativo con diez hojas completamente desplegadas; R<sub>1</sub> EL.: estado reproductivo; floración femenina y emergencia de estigmas. Aspersores elevados (3.20 m) por sobre el canopeo del cultivo; R<sub>1</sub> IN.: estado reproductivo; floración femenina y emergencia de estigmas. Aspersores introducidos (1.60 m) en el canopeo del cultivo; letras mayúsculas diferentes entre estados fenológicos indican diferencias significativas (P≤0.005) según test LSD; letras minúsculas diferentes entre velocidades del equipo indican diferencias significativas (P≤0.005) según test LSD.

**Figura 8.** Valores medios de UDpa para las cuatro dosis aplicadas (40, 24, 12 y 6 mm) en relación con el promedio de separación entre aspersores (m) de cada segmento para cuatro condiciones: i) línea entera negra, testigo; ii) interlineado gris, E. Vegetativo, estado vegetativo (promedios para V<sub>4</sub>, V<sub>6</sub> y V<sub>10</sub>); iii) línea entera gris, estado reproductivo con aspersores elevados (R<sub>1</sub>EL) y iv) interlineado negro, estado reproductivo con aspersores introducidos en el cultivo (R<sub>1</sub>IN).



Según diversos autores, la magnitud de las pérdidas de riego está condicionada por la capacidad de almacenamiento de las hojas (arquitectura foliar) y la cantidad de energía disponible para la evaporación, alcanzando valores de pérdidas entre 7 % y 10 %.

### Uniformidad de distribución y rendimiento

Se aplicaron 320 mm de riego durante el ciclo del cultivo, con productividades en-

tre 14 y 18 t ha<sup>-1</sup>, obteniendo los menores rendimientos en los segmentos iniciales (1 al 3), donde las uniformidades fueron menores (indistintamente de la dosis aplicada), en tanto que para el resto de los segmentos se estabilizó en 18 t ha<sup>-1</sup> (figura 9). La diferencia de productividad (4 t ha<sup>-1</sup>) se atribuye a la menor uniformidad de los segmentos iniciales, con aspersores espaciados a 5 m, dado que la dosis bruta aplicada fue la misma en todos los segmentos. En tal sentido, se encontró una disminución lineal de los rendimien-

tos con el aumento de la separación entre aspersores, considerando emisores distanciados entre 1.9 y 5.7 m (Aimar *et al.*, 2022). Del mismo modo, Martin (2015) determinó pérdidas de productividad de 2.5 t ha<sup>-1</sup> en maíz utilizando aspersores elevados sobre el cultivo.

### Pérdidas por evaporación y deriva (Re)

Por un lado, el componente Re tuvo baja variabilidad y poca incidencia en las pérdidas totales de agua, aun con diferencias entre valores de ETo y velocidad de viento muy amplios (Aimar *et al.*, 2022). Esto se explica por dos razones: debido a la baja deriva del viento (velocidad ≤ a 3 m s<sup>-1</sup>), y por el aspersor utilizado en los test que tiene un plato deflector ranurado que, combinado con una acción oscilante, asperja gotas entre 2 mm y 4 mm, las cuales son poco sensibles a la acción de los vientos y de la evaporación (Martin *et al.*, 2017). El promedio de las pérdidas por evaporación en los tres colectores ubicado en la base del equipo fue del 2 %, muy semejante a las pérdidas calculadas a través de la ecuación de Re.

Conocer el comportamiento de los emisores de un pivote central en condiciones de viento nos permite conocer la influencia sobre distribución y tamaño de las gotas asperjadas (Tarjuelo, 1995). Diversos autores indican que, si bien la deriva es uno de los principales componentes que afecta la Uniformidad, dependiendo de su sentido, puede no ser considerado una pérdida total, ya que esta puede quedar dentro del círculo de riego.

### Retención hídrica en el rastrojo

Se encontraron ecuaciones de regresión para determinar la fracción de riego retenida por los residuos de cosecha (Aimar *et al.*, 2022). Las variables significativas fueron: MS, materia seca (t ha<sup>-1</sup>), y dosis de riego aplicada (mm). Por el contrario, en las variables analizadas, intensidades de aplicación de los segmentos y contenido de agua inicial en el rastrojo no se encontró una relación significativa con la retención hídrica.

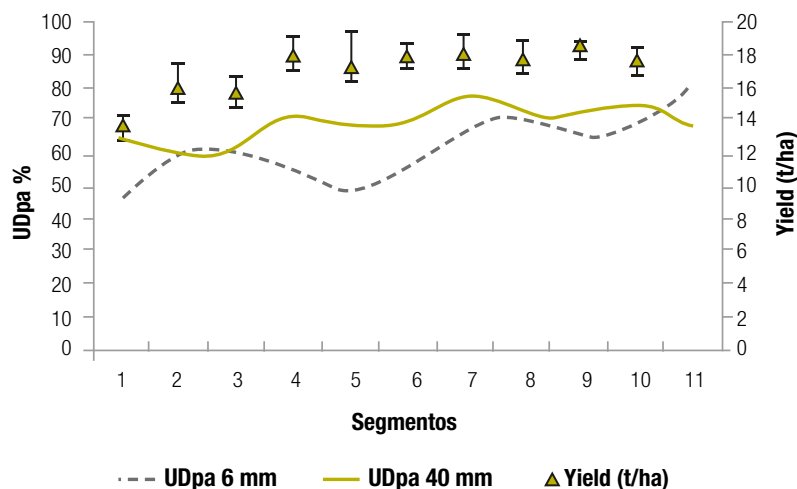
$$PSR = 0.44 + 0.05 * MS - 0.02 * Dosis$$

Ec 7

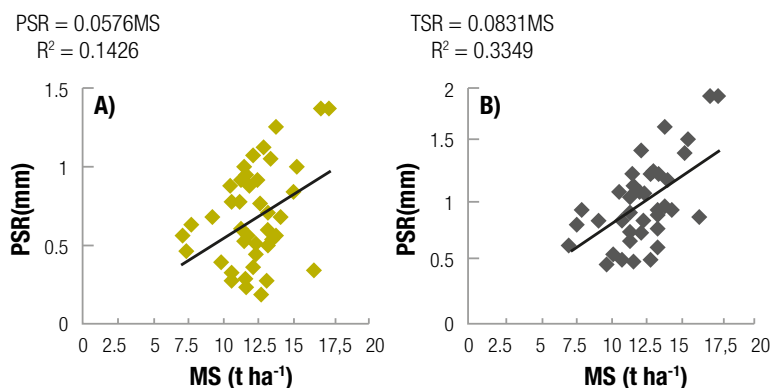
El agua retenida en el rastrojo se incrementa con el aumento de la materia seca, hasta un límite próximo a 2 mm y 1,5 mm considerando riego (Aimar *et al.*, 2022) y, de acuerdo a la Ec.7, solo el 5 % de la cantidad total de materia seca queda retenida. La máxima retención



**Figura 9.** Productividad promedio con intervalos de confianza y Uniformidad de Distribución (UDpa) promedio de los diferentes estados fenológicos del cultivo de maíz con dos dosis contrastantes (40 y 6 mm) para cada uno de los segmentos.



**Figura 10.** Materia Seca (MS, t ha<sup>-1</sup>) en relación con la retención parcial del rastrojo (PSR, izquierda) dada por el aporte exclusivo del riego y total del rastrojo (TSR, derecha), suma del contenido inicial del rastrojo más el agua aportada por el riego.



de riego puede representar una pérdida importante en relación con la dosis aplicada, p. ej. 25 % si se aplicase 7 mm. Estos niveles de retención fueron alcanzados con altas cantidades de MS (15 t ha<sup>-1</sup>), condición posible de lograr con cultivos irrigados y siembra directa, aportando mayor cantidad de residuos (Wu *et al.*, 2008). Además, en condiciones ambientales con altas temperaturas y humedad relativa aumenta la descomposición de los rastrojos (Denef *et al.*, 2008; Wu *et al.*, 2008) y lo contrario ocurre en climas fríos, donde se acumulan residuos por la baja tasa de mineralización (Kalbitz *et al.*, 2000; Chantigny, 2003).

Savabi y Stott (1994) encontraron que la relación entre el agua retenida en el rastrojo y MS responde a una ecuación cuadrática, con la pendiente

disminuyendo con el aumento de la materia seca. Se atribuye este comportamiento a la superposición de capas de residuos. Según estos autores, cuando se aplica agua (riego o lluvia), las gotas que llegan a la superficie del residuo son retenidas por fuerzas de adhesión y cohesión hasta que alcanzan un espesor tal que comienzan a actuar las fuerzas de gravedad. De continuar la aplicación de riego, la retención en la capa superior del residuo es constante, dado que las gotas que llegan desplazan a las existentes hacia estratos de residuos inferiores. En residuos de maíz, a medida que aumenta la descomposición, aumenta la macroporosidad e incrementa la capacidad de retención de agua del residuo (Iqbal *et al.*, 2013). De este modo, es función de la proporción existente de maíz en el rastrojo que aumente la proporción de macroporos

(67.93 % mazorca, 86 % en hojas 58.51 en tallos) (Zhang *et al.*, 2012) y por ende la capacidad de acumular agua, que luego se evapora dependiendo de las condiciones de viento, temperatura y radiación (Thapa *et al.*, 2021), hasta un máximo valor de materia seca.

Asimismo, el comportamiento de PSR para las distintas dosis aplicadas contrastó con MS dado que, a mayores dosis fue menor la cantidad de agua retenida. De este modo, las cantidades máximas de PSR y TSR (1.5 y 2 mm) ocurrieron con las dosis más bajas, en tanto el empleo de dosis de riego superiores a 25 mm resultó en valores de PSR y TSR menores a 0.5 y 1 mm respectivamente.

Para las dosis de 38 y 7 mm, a igual MS presente a campo, PSR representa porcentajes de pérdidas distintos, entre el 5 y 50 %, respectivamente. Estas pérdidas son posibles de disminuir mediante manejo del riego donde, altas velocidades de avance del pivote, aplican dosis relativamente bajas, por lo que porcentualmente las tasas de retención serán elevadas, en tanto que dosis mayores contribuirán a aminorar este efecto.

### Interceptación foliar y redistribución de agua en el suelo

#### Trascolación (Ta) y flujo a través del tallo (Sa)

La trascolación estuvo directamente relacionada tanto con la lámina colectada como con la diferencia de altura entre los aspersores, los colectores y las plantas (H, Ec 9). El mejor ajuste se obtuvo considerando una ecuación cuadrática (cada uno de los términos tuvo un nivel de significancia P≤0.0001).

$$Ta = -1.28 - 1.79 * H + 1.82 * LC - 0.04 * LC^2 \quad \text{Ec 8}$$

Donde LC: lámina colectada (mm); H: distancia vertical entre la altura del aspersor y la altura del colector (m). Para facilitar la aplicabilidad de Ec 8 y considerando que para obtener LC se requiere llevar a cabo mediciones de campo, se realizó una regresión que permite determinar esta variable (cada uno de los términos tuvo un nivel de significancia P≤0.0001).

$$LC = 2.83 * e^{0.05 * Dosis} \quad \text{(Ec 9)}$$

Donde LC: lámina colectada (mm) y Dosis aplicada (mm). El flujo que escurre a través de los tallos de maíz tuvo un comportamiento semejante a la trasco-

lación, con participación significativa de LC y H (cada uno de los términos tuvo un nivel de significancia  $P \leq 0.0001$ ).

$$Sa = -1.47 - 2.07 * H + 2.09 * LC - 0.05 * LC^2 \quad \text{Ec 10}$$

Donde LC: lámina colectada (mm); H: distancia vertical entre la altura del aspersor y la altura del colector (m).

### Redistribución de agua en el suelo

Los valores medios de lámina colectada y agua infiltrada en la entre línea fueron semejantes entre sí, pero diferentes a los valores medios de Ta obtenidos a partir de la Ec 8, en tanto las variables Sa, LI y AL tuvieron valores diferentes entre sí. No obstante, la suma de los diferentes componentes que intervienen en la entrelínea como en la línea del cultivo fueron aproximadamente iguales a la dosis aplicada (tabla 6). El mayor contenido hídrico sobre la línea del cultivo respecto a la entre línea se explica debido a que las hojas erectófilas (ej. maíz) presentan un ángulo de inserción foliar respecto al tallo menor a 90°, lo que provoca retención de agua en esta inserción y un escurrimiento hacia la base del tallo de hasta 50 % del total de la lámina de riego aplicada (Quinn y Lafen, 1983). Por un lado, Wesenbeek y Kachanoski (1988), midiendo agua en el suelo con sensores TDR, también encontraron un incremento en el contenido hídrico en la línea del cultivo, que atribuyeron al flujo preferencial a través del tallo. En la misma línea de investigación, Glover y Gwynne (1962) encontraron un mayor contenido hídrico en los 0.20 m circundantes a la planta de maíz y en los primeros 0.10 m de profundidad del perfil del suelo, en comparación con el contenido hídrico hallado en la entrelínea. Por otro lado, Warner y Young (1989) encontraron un flujo preferencial inmediatamente debajo de la hilera de maíz, determinando que más del 40 % de lo recibido de una lluvia incidente sería debido al movimiento a través del tallo.

**Tabla 6.** Valores medios (mm) de las componentes de riego medidas y estimadas tanto en la línea como en la hilera del cultivo en relación a la dosis aplicada.

Entrelínea (mm)		Línea (mm)		Dosis (mm)
AEL	12	AL	17	40*
LC	12	LI	26	
Ta	17	Sa	20	

\* La suma de las variables de cada fila es aproximadamente igual a la dosis aplicada (40 mm).

Donde AEL: (agua infiltrada en la entre línea, mm); AL: (agua infiltrada en la línea del cultivo, mm); Ta: trascolación (mm); LI: lámina Interceptada (mm); LC: lámina colectada (mm) y Sa: flujo a través del tallo (mm).

La diferencia entre la lámina interceptada (LI) y el agua infiltrada en la línea (AL), correspondiente a una dosis de 38 mm (tabla 6), se debería a alguna de las siguientes causas: a) lámina evaporada desde las hojas, b) lámina retenida por el residuo vegetal, c) lámina redistribuida por debajo del espesor de suelo evaluado. Para estimar este valor, utilizando las determinaciones del presente caso, de la diferencia entre LI y AL (9 mm), se acepta que la suma entre a) y b) fue aproximadamente de 4 mm, y 5 mm se habrían redistribuido debajo de 0.1 m (perfil medido).

La redistribución es muy importante e independiente del modo de aplicación del agua y se debe a la textura del suelo y a la conductividad hidráulica asociada al contenido hídrico previo a los eventos de riego (Li y Kawano, 1996; Martínez, 2004). Para el presente caso de estudio hubo importantes diferencias entre los valores medios de UDpa vs CUs. En  $R_{1EL}$ , los valores fueron 53.4 y 97.5 %, respectivamente y en  $R_{1IN}$  fueron 34.8 y 97 %, respectivamente. Li y Kawano (1996) y Dechmi (2002) relacionaron la uniformidad de la parte aérea con la del suelo en un cultivo de maíz encontrando, tanto en un suelo de origen volcánico como en otro de textura franco arenosa, que los valores de CUs excedían el 90 %, aun cuando los riegos se realizaran con uniformidad menor al 60 %. Resultados similares se encontraron en el presente trabajo donde, para el caso del cultivo de maíz en su máxima expansión foliar,

tuvo valores de UDpa y CUs de 40 y 90 %, respectivamente.

### Ecuación de eficiencia potencialmente aplicable

Se propone una nueva ecuación que considere nuevos componentes:

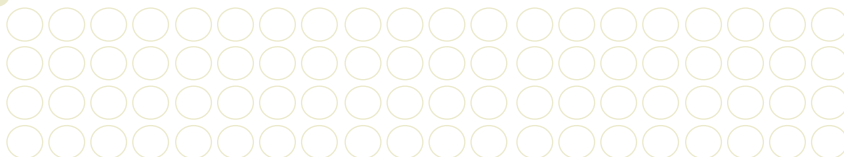
$$Efpa = Re * UDpa_{aj} * PSR * LI$$

Ec 11

Donde Efpa: eficiencia de aplicación potencialmente aplicable; Re: pérdidas por evaporación y deriva (Ec 2) y UDpaaj: UDpa ajustada según los días de emergencia del cultivo; PSR: pérdidas por retención parcial del rastrojo obtenida a partir de Ec 7 y dividida por la variable Dosis (mm) para convertirla en fracción de pérdida adimensional.

Todos los términos se encuentran explicados en el trabajo Aimar *et al.* (2022).

El componente LI incorpora tanto trascolación como escurrimiento a través del tallo, habiendo sido ajustada para maíz. Si bien se necesitan experimentos con otros cultivos para su validación, las variables incluidas (H y Dosis) se obtienen de manera sencilla, en tanto la expresión matemática combina términos lineales y exponenciales. El componente PSR es universal y aplicable en sistemas de siembra directa que incluyan rotaciones de gramíneas y leguminosas. La



medición de materia seca del rastrojo se debe hacer previo a la campaña de riego, y solo se necesita balanza y estufa de secado. Estos valores de MS pueden no cambiar si la rotación tiene un período suficiente (Gillabel, 2007; Trost, 2013) y ser obtenidos regionalmente por agencias de investigación pública.

La ecuación de UDpa (Keller y Bliesner, 1990) es equivalente a la condición testigo que representa una evaluación estándar del pivote según las normas ANSI/ASAE (2001). Esta puede realizarse al menos una vez al año para corroborar el funcionamiento de los aspersores. Para incluir el efecto que tiene un cultivo de alto porte (ej. maíz) en la uniformidad de distribución se propone una ecuación ajustada que incluye los días desde la emergencia, aspecto sencillo de obtener por los agricultores.

## CONSIDERACIONES FINALES

La información obtenida a partir de los resultados facilita y da previsibilidad a la toma de decisiones y puede introducir mejoras sencillas en el sistema para aumentar la eficiencia de aplicación del riego por aspersión. La metodología para su réplica resulta sencilla, práctica y de bajo costo, que puede ser utilizada por productores, técnicos, asesores y regantes para hacer un uso racional y sostenible de los recursos.

La adaptación de la ecuación eficiencia de aplicación de Keller y Bliesner puede utilizarse en pivote central (utilizando CUHyH) y agrega, sumado al factor original de evaporación y deriva dos importantes componentes de pérdidas: retención de agua de riego por el rastrojo e interceptación foliar.

Además, la disminución en la eficiencia de aplicación puede deberse a varios factores:

- Disminución de la Uniformidad. En el caso de estudio, considerando una proporción de área bien regada de 80 %, se alcanzaron valores de uniformidad de distribución (UD) de buenos a excelentes (85 a 90 %) en la condición testigo; esta disminuye con el crecimiento del cultivo hasta aproximadamente un 45 % en estado vegetativo avanzado ( $V_{10}$ ) (tabla 5). En estados reproductivos, con emisores introducidos en el dosel (en contraste con aspersores por sobre el canopeo), la UD disminuyó del 60 % al 20 % al aumentar la separación entre aspersores. En un cultivo de alto porte como el maíz debe existir una distancia mínima de 0.40 m entre la altura de los aspersores y el dosel para disminuir

la interferencia en la trayectoria de las gotas. Criterio para tener en cuenta al momento de la fertirrigación.

Aun con valores tan bajo de UD del 20 %, se alcanzaron en el suelo CUs del 97.5 %. Sin embargo, se encontraron diferencias de productividad de 4 t ha<sup>-1</sup> atribuibles a la menor uniformidad de los tramos iniciales (con aspersores distanciados a 5 m).

Las diferentes dosis analizadas (38, 24, 14 y 7 mm) tuvieron impacto en la uniformidad a partir de  $V_{10}$ . Cuando se aplicaron dosis de 7 mm, la UD disminuyó significativamente, siendo este un criterio de manejo del riego para tener en cuenta. Se demostró a su vez que variaciones de intensidades a lo largo del pivote de 5.7 a 77.4 mm h<sup>-1</sup> no influyeron en la uniformidad de distribución.

- Por evaporación y deriva. El promedio de pérdidas fue del 2 %, indicando que la ecuación utilizada para determinar pérdidas por evaporación y deriva no tuvo una influencia significativa en la ecuación general de eficiencia. Esto se explica por la baja deriva del viento (velocidad  $\leq$  a 3 m s<sup>-1</sup>).
- Por retención en el rastrojo. Se ajustó una ecuación para considerar las pérdidas por retención de agua de riego en el residuo vegetal, siendo las variables independientes la cantidad de materia seca de rastrojo y las dosis aplicadas. El valor máximo de pérdida fue 3 mm con 15 t ha<sup>-1</sup> de materia seca y la mayor proporción de pérdida (50 %) fue con la menor dosis aplicada (6 mm).
- Por interceptación foliar. Las pérdidas representan entre 3 y 10 % de la dosis aplicada. Para su estimación se ajustó una ecuación no lineal que incluye un componente de escurrimiento a través del tallo (*stemflow*) y a través del follaje (*throughfall*).

## FINANCIACIÓN

Este trabajo contó con el apoyo financiero del Proyecto INTA N 2019-PE-E2-1505-001: Uso y Gestión Eficiente del Agua en Sistemas de Regadío.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria por proporcionar los fondos y permitirnos utilizar las instalaciones para llevar a cabo este proyecto. La empresa IRRIR-AR proporcionó el sistema de pivote central utilizado en el ensayo.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANSI/ASAE S436.1. 2001. Test procedure for determining the uniformity of water distribution of center pivot and lateral move irrigation machines equipped with spray or sprinkler nozzles. American Society of Agricultural Engineers. EUA.
- AYERS, R.; WESTCOT, D. (1989). Water quality for agriculture. Irrigation and Drainage. Paper n.º 29 rev 1. FAO, Roma. 174 p.
- BUSCHIAZZO, D.E.; PANIGATTI, J.L.; UNGER, P.W. (1998). Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. Soil Tillage Res. 49, 105-116.
- CHRISTIANSEN, J.E. (1942). Irrigation by sprinkling. California Eg. Exp. Sta. Bull. 670 p.
- DECHMI, F. (2002). Gestión del agua en sistemas de riego por aspersión en el valle de Ebro: análisis de la situación actual y simulación de escenarios. Tesis Doctoral. Universidad de Lleida, Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón.
- DÍAZ ZORITA, M.; DUARTE, G.A.; GROVE, J.H. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. Soil Tillage Res. 65, 1-18.
- FERNÁNDEZ, J.E.; ALCON, F.; DIAZ-ESPEJO, A.; HERNANDEZ-SANTANA, V.; CUEVAS, M.V. (2000). Water use indicators and economic analysis for on-farm irrigation decision: A case study of a super high density olive tree orchard. Agric. Water Manag. 237, 106074.
- FOLLET, R.F. (2001). Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. Soil Till. Res. 61, 77-92 pp.
- GIUBERGIA, J.P. (2013). Efectos del riego complementario sobre propiedades del suelo en sistemas de producción con siembra directa. Tesis de Magíster de la Universidad de Buenos Aires, área Ciencias del Suelo. Escuela para Graduados "Alberto Soriano". Facultad de Agronomía. UBA. 156 pp.
- HEERMANN, D.F.; HEIN, R. (1968). Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation system", Transactions of the ASAE 11(1): 11-15 pp.
- IQBAL., A.; BEAGRAND, J.; GARNIER, P.; RECOUS, S. (2013). Tissue density determines the water storage characteristics of crop residues. Plant Soil 367, 285-299. <https://doi.org/10.1007/s11104-012-1460-8>

- JUNTA DE ANDALUCÍA. (1999). Actualización 2002. Consejería de Agricultura y Pesca, Inventario y Caracterización de los Regadíos de Andalucía. España.
- KELLER, J.; BLIESNER, R.D. (1990). Sprinkle and trickle irrigation. Sprinkler and trickle irrigation. AVI Book, Van Nostrand Reinhold, Nueva York, EUA.
- LAMM, F.R.; BORDOVSKY, J.P.; HOWELL, T.A. (2019). A review of in-canopy and near-canopy sprinkler irrigation concepts. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 62(5): 1355-1364. <https://doi.org/10.13031/trans.13229>
- LAMM, F.L.; MANGES, H.L. (2000). Partitioning of sprinkler irrigation water by corn canopy. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 43(4): 909-918. doi: 10.13031/2013.2987
- LECINA, S. Y HILL, R.W. (2014). Uniformidad de riego bajo diferentes condiciones socio-económicas: evaluación de pivotes en Aragón (España) y Utah (EEUU). xxxii Congreso Nacional de Riegos. Madrid. <http://hdl.handle.net/10261/98436>
- LI, J.; KAWANO, H. (1996). The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation. *Agricultural Water Management*. 32:29-36.
- LIU, H.J.; ZHANG, R.H.; ZHANG, L.W.; WANG, X.M.; LI, Y.; HUANG, G.H. (2015). Stemflow of water on maize and its influencing factors. *Agric. Water Manag.* 158, 35-41.
- MARTIN, D.L.; KRANZ, W.L.; SMITH, T.; IRMAK, S.; BURR, C.; YODER, R.E. (2017). *Center-Pivot Irrigation Handbook*; Publication EC3017; University of Nebraska-Lincoln: Lincoln, NE, EUA. 132 p. (Disponible: <https://extensionpublications.unl.edu/assets/pdf/ec3017pdf> verificado: 01 de marzo de 2022).
- MARTINEZ, S.R. (2004). Uniformidad de distribución de agua en el suelo en riego por aspersión y rendimiento del cultivo de maíz. Tesis de Doctorado. Castilla, La Mancha, España.
- MONTAZAR, A.; SADEGHI, M. (2008). Effects of applied water and sprinkler irrigation uniformity on alfalfa growth and hay yield. Department of Irrigation and Drainage Engineering, College of Aboureyhan, University of Tehran, P.O. Box 11365-4117, Pakdasht, Irán.
- PANIGATTI, J.L. (2010). Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. INTA Buenos Aires. 345 p.
- QUINN, N.W.; LAFLEN, J.M. (1981). Properties of transformed rainfall under corn canopy. *Trans. ASAE* 26:1445-1450.
- QUINN, N.W.; LAFLEN, J.M. (1983). Characteristics of raindrop throughfall under corn canopy. *Sociedad Estadounidense de Ingenieros Agrícolas y Biológicos*, St. Joseph, Michigan. [www.asabe.org](http://www.asabe.org)
- SAVABI, M.R.; STOTT, D.E. (1994). Plant residue impact on rainfall interception. *Trans. ASAE* 37, 1093-1098.
- THAPA, R.; TULLY, K.L.; CABREARA, M.; DANN, C.; SCHOMBERG, H.H.; TILIND, D.; GASKIN, J.; REBERG-HORTON, C.; SEVEN, B.; MIRSKY, S.B. (2021). Cover crop residue moisture content controls diurnal variations in surface residue decomposition. *Agricultural and forest meteorology* 308-309. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108537>
- THOMPSON, A.L.; MARTIN, D.R.; NORMAN, J.M.; TOWELL, T.A. (1996). Scheduling effects on evatranspiration with overhead and below canopy application. *Proceedings of the international conference. Evapotranspiration and irrigation scheduling*. St. Joseph, Mich.: ASAE. 182-188.
- TOLK, J.A.; HOWELL T.A.; STENIER, J.L.; KRIEG D.R.; SCHNEIDER A.D. (1994). Role of transpiration suppression by evapRole of transpiration suppression by evaporation of intercepted water. *Irrigation Science* 16, 89-95. 10.1007/BF00189165
- UNGER, P.W. (1991). Organic matter, nutrient and pH distribution in no and conventional tillages semiarid soils. *Agron. J.* 83: 186-191 pp.
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. (1982). How a corn plant develop. Special report N° 48. Iowa State University of Science and Technology Cooperative Extension Service Ames, Iowa.
- WESENBEECK, I.J.; KACHANOSKI, R.G. (1988). Spatial and temporal distribution of soil water in the tilled layer under a corn crop. *Soil Soc. Am J.* 52(2)363-368 pp.
- ZHANG, Y.; GHALY, A.E.; LI, B. (2012). Physical Properties of Corn Residues. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 8(2), 44-53. doi:10.3844/ajbb.2012.44.53