

Pautas de mejora en la aplicación de riego por aspersión con pivote central, sobre cultivos en siembra directa continua.

Federico Aimar¹⁻² aimar.federico@inta.go.ar, Roberto Paulo Marano³ rmarano@fca.unl.edu.ar, Aquiles Salinas¹ salinas.aquiles@inta.gob.ar, Juan Pablo Giubergia¹⁻² giubergia.juan@inta.gob.ar, Ignacio Severina¹⁻⁴ severina.ignacio@inta.gob.ar,

¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria EEA INTA Manfredi, Argentina

² Facultad de Ciencias Agropecuarias -Universidad Nacional de Córdoba -UNC- Córdoba Argentina

³ Instituto de Ciencias Agropecuarias del Litoral (ICiAgro Litoral), Universidad Nacional del Litoral, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Facultad de Ciencias Agrarias Esperanza, Provincia de Santa Fe, Argentina

⁴ Universidad Nacional de Villa María - UNVM - Córdoba – Argentina

1. 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 operación adecuados para el correcto funcionamiento agronómico e hidráulico, por lo que su evaluación debe ser un procedimiento a tener en cuenta, con la finalidad de detectar fallas de manera oportuna para su solución (Román et al., 2005).

Las herramientas potenciales de manejo para el uso eficiente del agua y 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. En los últimos años, la potencialidad productiva de los valles del Río Negro dio lugar al desarrollo de diversos proyectos de riego, muchos de ellos en base a

riego por aspersión a gran escala, sistema no tradicional en la zona. Estos desarrollos se ubicaron principalmente en la región de Valle Medio e Inferior del río, el cual se convierte en la fuente única de abastecimiento del agua y posee un caudal medio de $930 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. El área bajo riego, en esa región, actualmente supera las 80.000 ha, con distintos sistemas de riego y cultivos diversos. Sin embargo, existe potencial para triplicar esta superficie (FAO, 2014), por lo que será clave contar con los conocimientos necesarios para manejar eficientemente el agua en los sistemas productivos emergentes (Madias y Gutierrez, 2014, resultados no publicados).

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 (Evans y King, 2012; Tun et al., 2011).

La eficiencia de aplicación (Efpa) es considerada a nivel parcelario y está fuertemente relacionada a la uniformidad de distribución del agua y al método de riego elegido (Hsiao et al., 2017). En riego por aspersión, los factores más importantes que definen la Efpa son (after 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- influenciado 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 (spray, rotator, diámetros de boquilla, separación, patrón de distribución) y su posición en relación al 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 características del suelo (infiltración, cantidad y composición de los residuos de cosecha, 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) (Merrian y Keller, 1978), para un porcentaje de área adecuadamente bien regada (pa) y c) Pérdidas por evaporación y deriva de las gotas asperjadas.

La interceptación 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 Laflen, 1983; Montazar y Sadegui, 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). Estos autores generaron diferentes ecuaciones que permiten cuantificar la partición de agua de riego en su curso hacia el suelo, diseñada para aspersores de impacto de alta presión y giratorios de baja presión, partiendo del conocimiento de la dosis aplicada y distanciamiento de plantas adyacentes en la línea de siembra. Sin embargo, estas ecuaciones no se integran a una ecuación general de eficiencia de riego por aspersión.

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 trasporte 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 (Roper et al., 2021, 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.

Cuantificar 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 y/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.

Palabras claves: uniformidad de distribución, retención hídrica en el residuo vegetal e interceptación foliar.

2. Metodología

2.1 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 a 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).

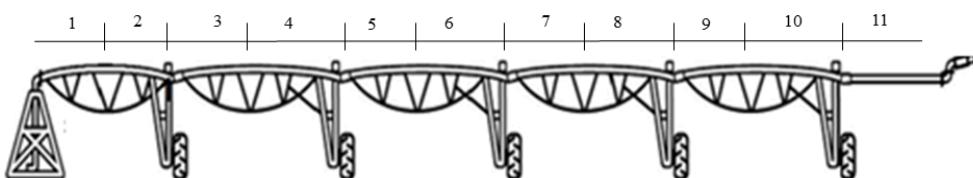


Figura 1. Equipo de riego utilizado y disposición de segmentos a lo largo del mismo.

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 funcionamiento necesita un tramo recto sin turbulencia. Esta medición se realiza, una vez instalado el equipo, en cada

aspensor y se repite por triplicado durante veinte minutos. Se toma la lectura antes y después de cada medición para conocer el volumen aplicado.



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

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 largo mínimos deben ser 60 mm y 120 mm respectivamente.

2.2 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):

$$Efp_a = Oe \times Re \times UDpa \quad \text{Ec (1)}$$

Donde Oe: pérdidas originadas por fugas en las tuberías, que se consideraron igual a 1 en este trabajo; Re: 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 Efp_a fueron (Keller and Bliesner, 1990):

$$Re = 0.976 + 0.005 * ET_o - 0.00017 * ET_o^2 + 0.0012 * WS - CI * (0.00043 * ET_o + 0.0001) \quad \text{Ec (2)}$$

Donde ETo: Evapotranspiración de referencia (mm día⁻¹); WS: Velocidad del viento (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 Re 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 $CI > 17$, entonces $CI = 17$. La presión de trabajo utilizada fue dada por los reguladores de presión de cada aspersor

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

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

Donde pa: fracción de área adecuadamente 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 (CUCHyH), dado que este indicador de uniformidad es específico para pivote central.

$$CUHyH = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{D_i}{C_i} - M_c}{\sum_{i=1}^n C_i D_i} \right) * 100 \quad \text{Ec (5)}$$

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

Como novedad, a la ecuación original de Keller Bliesner (Ec. 1) se le incorporaron los componentes de Retención del residuo Vegetal (RR) e Interceptación Foliar (LI).

2.3 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° y maíz 1° 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 IWob 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 dS m^{-1} y 683 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.

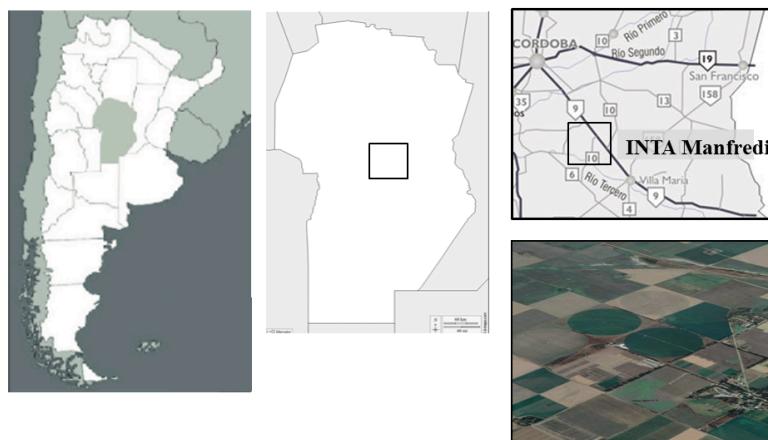


Figura 3: Ubicación Estación Experimental INTA Manfredi

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 0.52m 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 4 a). 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 4. a) Ubicación de colectores en el interfilar del cultivo de maíz (izquierda) y b) colectores en la condición Testigo sin cultivo (derecha).

2.4. Momentos de evaluación y posición de aspersores

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 al suelo) (Tabla 1).

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)
*Estado fenológi co	Testigo	3	3	3	3	-
	V ₄	1	1	1	1	1.2
	V ₆	1	1	1	1	1.4
	V ₁₀	1	1	1	1	1.55
	R ₁ IN	3				2.8
	R ₁ EL	3	-		2.8	3

*Estado fenológico del maíz (Ritchie y Hanway, 1982); V₄: Cuatro hojas completamente desplegadas; V₆: Seis hojas completamente desplegadas; V₁₀: Diez hojas completamente desplegadas; R₁ IN: Floración femenina, emergencia de estigmas y aspersores dentro del cultivo (1.60 m); R₁ EL: Floración femenina, emergencia de estigmas y aspersores elevados por sobre el cultivo (3.20 m). Número de colectores: 94.

Por otro lado, se puede corroborar el posible efecto que tendría la separación entre aspersores en relación a 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 (R₁In) y iv) estado reproductivo con aspersores elevados (R₁EI).

2.5. Rendimiento en función de la Uniformidad de Distribución

Para relacionar la productividad del cultivo de maíz con UDpa en cada uno de segmentos, se seleccionaron 3 parcelas de 25 m² (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%).

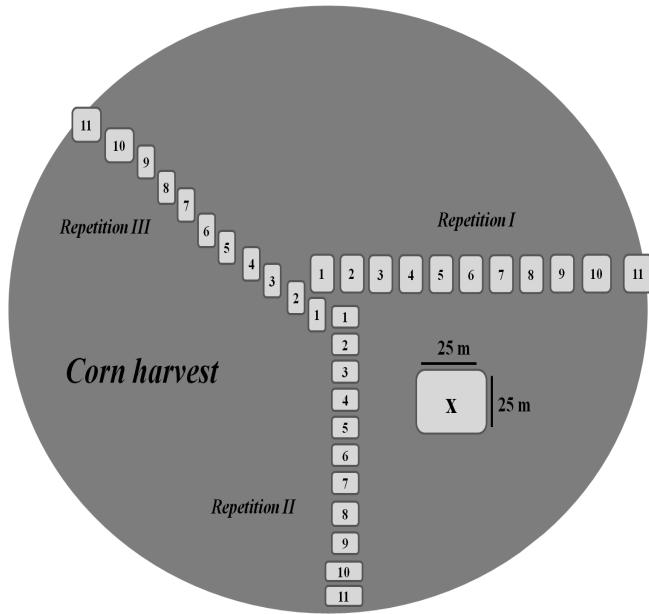


Figura 5: Distribución de las parcelas cosechadas de maíz (25m por 25 m) dentro del círculo de riego.

2.6. 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 ($0,25 \text{ m}^2$) dentro de las 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.



Figura 6) cuadrícula metálica de 0.25 m² utilizada para realizar el muestreo y operario cortando el residuo vegetal

2.7. 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 T_a : Throughfall, trascolación (mm) y S_a : Stemflow, flujo a través del tallo (mm). Para determinar Ta se utilizaron dos procedimientos con el cultivo en R1 (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 líneas (AEL) fueron correlacionadas con Ta, 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 (Sa).

A su vez, Sa puede considerarse equivalente a la lámina interceptada, obtenida como la diferencia entre la dosis aplicada y lámina colectada (LC); en tanto no se tuvo en cuenta el componente de evaporación desde el follaje, dadas las características de la hoja de maíz (Steiner et al., 1983; Schneider and Howell., 1995; Thompson et al., 1996).

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); h_a : altura del aspersor respecto a la superficie del suelo (m); h_p : altura de la planta, considerándose a ésta desde el suelo hasta la base del tallo donde se inserta la última hoja desplegada (m); h_c : altura del colector desde el suelo hasta el bisel (0.50 m).

3 Resultados y Discusión

3.1 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 C.V debe ser menor a 10% para considerar que la pluviometría media no presenta grandes variaciones.

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

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 incrementando de 5 a 7 mm h⁻¹ en los segmentos sucesivos (Tabla 3), lo cual permitió representar los cambios de pluviometría a lo largo del equipo.

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 mm h ⁻¹	CI	Velocidad de avance			
					100%	50 %	25 %	15 %
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

Dónde: CI, índice de pulverización, adimensional

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

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 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 sub-irrigada mayor y ello depende tanto de la sensibilidad al déficit hídrico como del valor económico del cultivo utilizado (Lecina, 2014).

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

Tabla 4: Promedio de CUHyH y de UDpa de las cuatro dosis utilizadas en la condición Testigo

		Segmentos										
CUHyH pa (%)	93. 6	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
		86. 9	89. 4	88. 9	83. 0	93. 4	91. 5	85. 2	83. 3	88. 7	86. 1	
7	96.	91.	93.	92.	89.	95.	94.	90.	89.	92.	91.	
0	8	5	1	8	0	7	5	4	2	6	0	
7	94.	89.	91.	90.	85.	94.	92.	87.	86.	90.	88.	
5	1	1	2	7	9	5	9	7	1	6	5	
8	93.	86.	88.	88.	82.	93.	91.	84.	82.	88.	85.	
0	4	3	9	3	2	1	1	5	5	1	5	
8	92.	82.	86.	85.	77.	91.	88.	80.	78.	85.	81.	
5	5	8	0	4	7	3	8	6	1	1	8	
9	91.	78.	82.	81.	72.	89.	86.	75.	72.	81.	77.	
0	5	5	5	7	2	1	0	7	6	4	2	

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

3.2.2. Uniformidad de Distribución en Estados Vegetativos

Al alcanzar el cultivo una altura de 1,20 m (V_4 , 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_6) 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 Merrian y Keller (1979). Con los aspersores próximos a introducirse dentro del cultivo (V_{10} , 1,55 m) se acentuó la disminución de UDpa con respecto al Testigo, alcanzando valores entre 20% y 40% (Figura 7d).

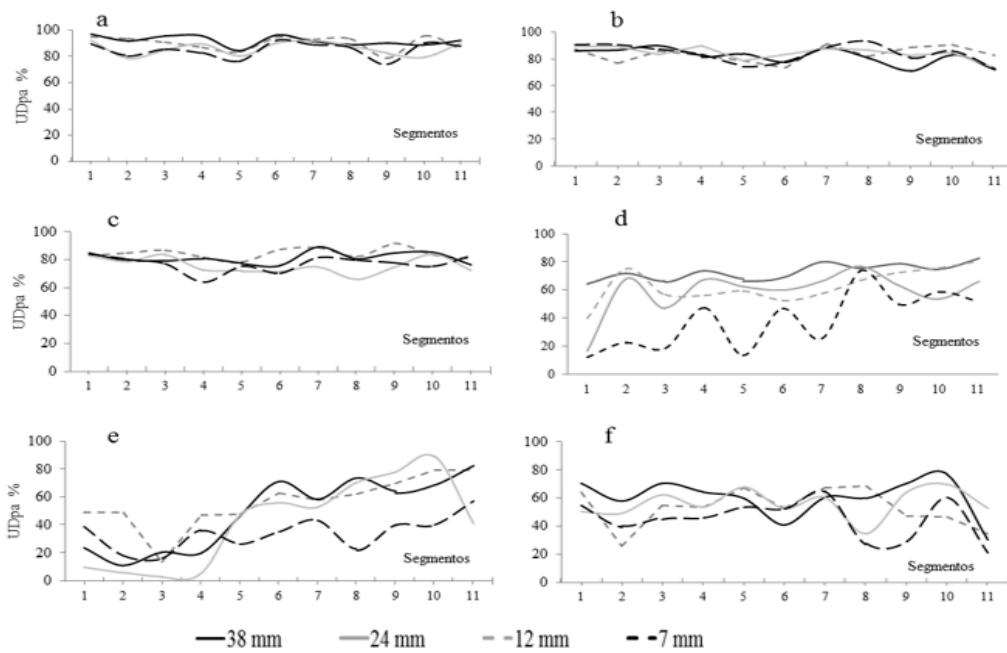


Figura 7: Uniformidad de Distribución (UDpa) de los distintos Segmentos con aspersores a 1.6 m del suelo y pa 80% para: a) condición Testigo; b) maíz en V_4 a 1.2 m de altura; c) maíz en V_6 a 1.4 m de altura; d) maíz en V_{10} a 1.55 m de altura; e) maíz en su máxima expansión foliar (R_1), altura promedio 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).

3.2.3. 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 ($R_1\text{IN}$, debajo de la canopia) y a 3 m del suelo ($R_1\text{EL}$, 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 a la uniformidad, siendo un criterio de manejo del riego para tener en cuenta.

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%	
	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 C b	11.8
V ₄	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 ₆	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 ₁₀	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 ₁ 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 ₁ 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; V₄: estado vegetativo con cuatro hojas completamente desplegadas; V₆: estado vegetativo con seis hojas completamente desplegadas; V₁₀: estado vegetativo con diez hojas completamente desplegadas; R₁ EL.: estado reproductivo; floración femenina y emergencia de estigmas. Aspersores elevados (3.20 m) por sobre el canopeo del cultivo; R₁ 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 ($P \leq 0.005$) según test LSD; letras minúsculas diferentes entre

velocidades del equipo indican diferencias significativas ($P \leq 0.005$) según test LSD

3.2.4. Uniformidad de Distribución y Fertirrigación nitrogenada

Investigaciones referidas a la respuesta de fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz para la región pampeana, determinaron un fuerte condicionamiento a la disponibilidad hídrica, definiendo umbrales en cuanto a cantidades a partir de los cuales estimaron que a partir del estado $V_5 - V_6$ habría menos respuesta productiva (Salvagiotti et al., 2002). En la misma línea Melchiori (2002) y Bianchini (2004), indicaron que aportes de N/NO₃ en el suelo a partir de V_6 no tendría respuesta o, al menos, serían poco frecuentes. En base a lo anterior y a los resultados de UDpa se recomienda fertirrigar en estadios vegetativos tempranos.

3.2.5. 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 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 Martin D 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).

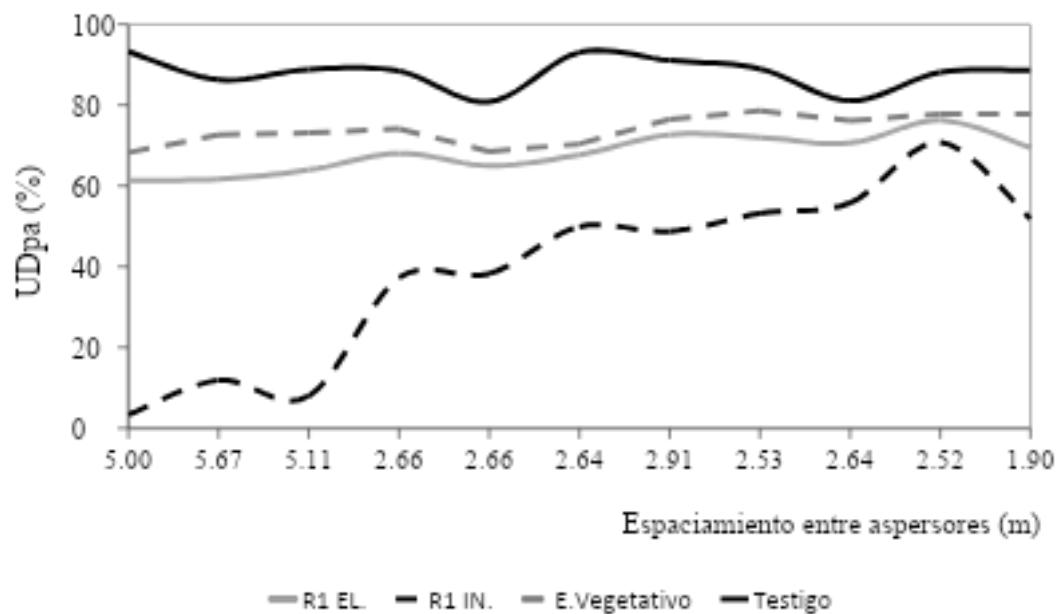


Figura 8: Valores medios de UDpa para las cuatro dosis aplicadas (40, 24, 12 y 6 mm) en relación al promedio de separación entre aspersores (m) de cada segmento, para cuatro condiciones: i- línea entera negra, Testigo; ii- interlineado gris, E.Vegetativo, estado vegetativo (promedios para V_4 , V_6 y V_{10}); iii- línea entera gris, estado reproductivo con aspersores elevados (R_1El); y iv) interlineado negro, estado reproductivo con aspersores introducidos en el cultivo (R_1IN).

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). 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%. En la misma línea

3.2.6. Uniformidad de Distribución y Rendimiento

Se aplicaron 320 mm de riego durante el ciclo del cultivo, con productividades entre 14 y 18 ton ha^{-1} , 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 ton ha⁻¹ (Figura 9). La diferencia de productividad (4 ton ha⁻¹) 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 rendimientos 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 tn ha⁻¹ en maíz utilizando aspersores elevados sobre el cultivo.

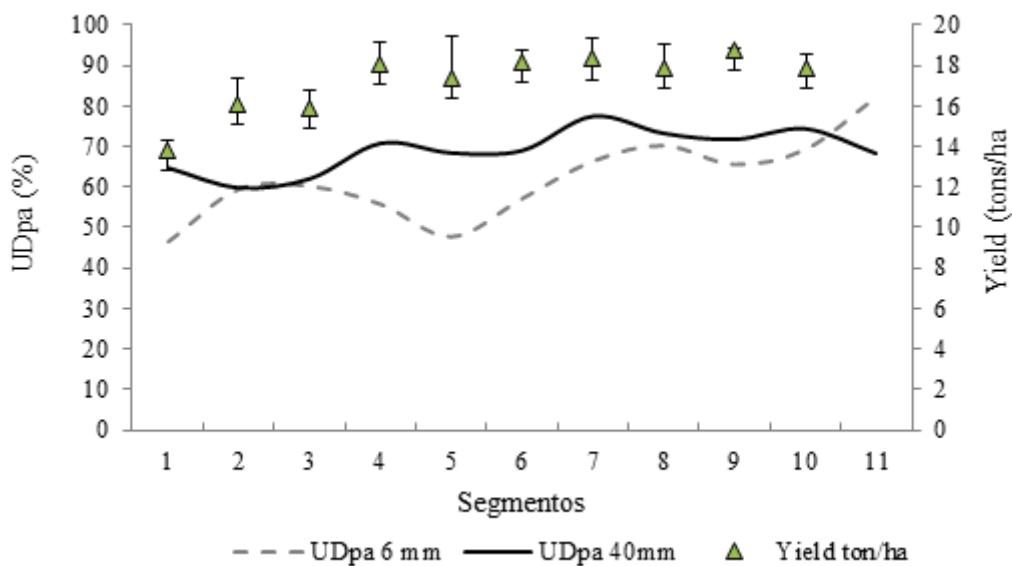


Figura 9: Productividad promedio con intervalos de confianza y Uniformidad de Distribución (UDpa) promedio de los diferentes estados fenológicos del cultivo de maíz con dos dosis contrastantes (40 y 6 mm) para cada uno de los segmentos.

3.3. Pérdidas por evaporación y deriva (Re)

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⁻¹), ya que 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.

Por otro lado, al aspersor utilizado en los test 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). 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 afectan la Uniformidad, dependiendo del sentido de la misma, puede no ser considerado una pérdida total, ya que la misma 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 (ton ha⁻¹), 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

Tanto la retención parcial como la retención total del rastrojo aumentaron con el incremento de MS (Figura 10), pero hubo una mayor variabilidad en PSR respecto a TSR ante una misma cantidad de MS (CV de 45 y 35% respectivamente).

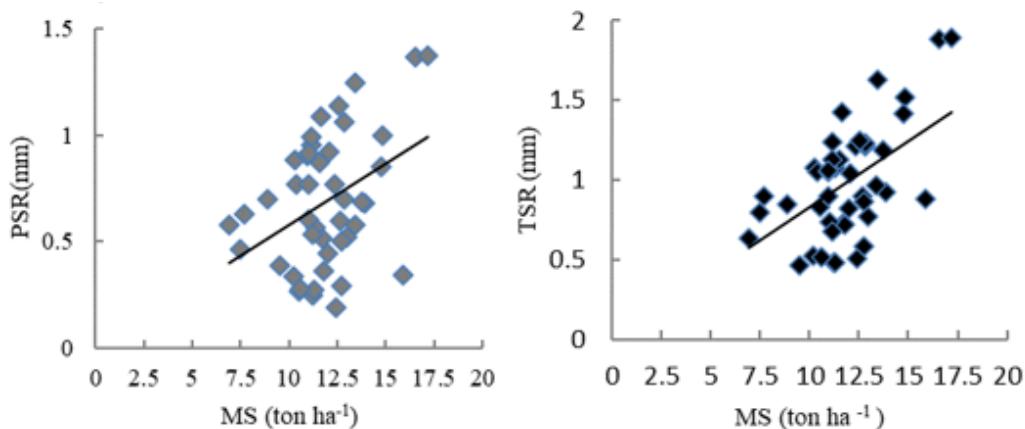


Figura 10: Materia Seca (MS, tn ha⁻¹) en relación a la retención parcial del rastrojo (PSR, izquierda) dada por el aporte exclusivo del riego y total del rastrojo (TSR, derecha), suma del contenido inicial del rastrojo más el agua aportada por el riego.

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 de riego puede representar una pérdida importante en relación a la dosis aplicada, p.e. 25% si se aplicase 7 mm. Estos niveles de retención fueron alcanzados con altas cantidades de MS (15 ton ha⁻¹), condición posible de lograr con cultivos irrigados y siembra directa, aportando mayor cantidad de residuos (Wu et al., 2008). Por otro lado, 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, atribuyendo 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, incrementando 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., 2021) y por ende la capacidad de acumular agua, la cual luego se evapora dependiendo de las condiciones de viento, temperatura y radiación (Thapa, R. et al 2021), hasta un máximo valor de materia seca.

Por otra parte, 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 van a contribuir a aminorar este efecto.

3.4. Interceptación foliar y redistribución de agua en el suelo

3.4.1. Trascolación (Ta) y Flujo a través del tallo (Sa)

La trascolación estuvo directamente relacionada tanto con la lámina colectada como a 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).

$$Ta = -1.28 - 1.79 * H + 1.82 * LC - 0.04 * LC^2$$

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).

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

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 trascolación, con participación significativa de LC y H (cada uno de los términos tuvo un nivel de significancia P≤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)

3.4.2. Redistribución de agua en el suelo

Los valores medios de lámina colectada y agua infiltrada en la entre líneas 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 las 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 líneas se explica debido a que las hojas erectófilas (e.g. 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 Laflen, 1983). 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 al 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 de 40% de lo recibido de una lluvia incidente sería debido al movimiento a través del tallo.

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).

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
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 redistribución es muy importante e independiente del modo de aplicación del agua y se debería 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 R₁EL, los valores fueron 53.4 y 97.5 % respectivamente, en tanto también en R₁IN, fueron 34,8 y 97% respectivamente. Li y Kawano (1996) y Dechmi (2002) relacionaron la uniformidad de la parte aérea respecto a 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, dónde, para el caso del cultivo de maíz en su máxima expansión foliar tuvo valores de UDpa y CUs de 40 y 90% respectivamente.

3.5. Ecuación de eficiencia potencialmente aplicable

Se propone una nueva ecuación que considere nuevos componentes:

$$Efpa = Re * UDpa_{aj} * PSR * LI \quad Ec\ 11$$

Dónde: Efpa: Eficiencia de aplicación potencialmente aplicable; Re: pérdidas por evaporación y deriva (Ec 2) y UDpa_{aj}: 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, siendo su obtención sencilla dado que solo se necesita una estufa para secado. Estos valores pueden no cambiar si la rotación tiene

un período de tiempo 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). La misma 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 (e.g 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.

4. Consideraciones finales

La información obtenida a partir de los resultados, facilitan y dan previsibilidad a la toma de decisiones, pudiendo 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, la cual 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.

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

4.1. 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; ésta 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 a tener en cuenta al momento de la fertirrigación.

Aún 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 ton ha⁻¹ atribuibles a la menor uniformidad de los tramos iniciales (con aspersores distanciados a 5 m). Se considera ensayar las mediciones de agua en el suelo a mayor profundidad debido a las diferencias no expresadas para el perfil de suelo analizado (0.10 m).

Las diferentes dosis analizadas (38, 24, 14 y 7 mm) tuvieron impacto en la uniformidad a partir de V₁₀. Cuando se aplicaron dosis de 7 mm la UD disminuyó significativamente, siendo éste 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⁻¹, no influyeron en la uniformidad de distribución.

4.2. 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 ≤ a 3 m s⁻¹), indicándose aspersores con plato de alcance de gotas ≥4 mm para velocidades de viento ≥5 m s⁻¹.

4.3. 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 2 mm con 15 ton ha⁻¹ de materia seca y la mayor proporción de pérdida (33%) fue con la menor dosis aplicada (6 mm).

4.4. 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).

Agradecimientos

Fuentes de financiación

BIBLIOGRAFÍA

- ALLEN, R.; KELLER, J. and MARTIN, D. 2000. Center Pivot System Design, 2000. The Irrigation Association VA, US.
- 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. USA.
- ARSHAD, M.A.; FRANZLUEBBERS, A.J. and AZOOZ, R.H.. 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil Till. Res.* 53: 41-47.
- AYERS, R. and WESTCOT, D. 1989. Water quality for agriculture. *Irrigation and Drainage*. Paper nº 29 rev 1. FAO, Roma. 174 p.
- Calidad de las aguas subterráneas para riego suplementario en la provincia de Córdoba. Boletín de divulgación técnica nº 10. EEA. INTA Manfredi (Ed.), Argentina, 18 p.
- Christiansen, J.E. 1942. Irrigation by sprinkling. California Eg. Exp. Sta. Bull. 670.
- 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.
- Di Rienzo, J.A.; Casanoves, F.; Balzarini, M.G.; Gonzales, L.; Tablada, M. y Robledo, C.W. InfoStat versión 2009. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- FAO, 2011. El estado de los recursos y de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. La gestión de los sistemas en situación de riesgo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Roma y Mundi-prensa, Madrid. p. 338.

- Follett R.F. 2001. Soil management concepts and carbon sequestration in cropland soils. *Soil Till. Res.* 61, 77–92.
- Giubergia, J.P. 2013. Efectos del riego complementario sobre propiedades del suelo en sistemas de producción con siembra directa. Tesis de Magister de la Universidad de Buenos Aires, área Ciencias del Suelo. Escuela para Graduados “Alberto Soriano”. Facultad de Agronomía. UBA. 156 pp.
- Giubergia J. Y Rampoldi A. 2017. Riego suplementario con aguas de mediana a baja calidad en la ecorregión pampeana y del espinal (Argentina). Efectos sobre suelos y cultivos: Riego complementario en la provincia de Córdoba. En: Ambientes salinos y alcalinos de la Argentina. Recursos y aprovechamiento productivo. Lavado y Taleisnik (Eds.). 2017.
- Gorgas, J.; Lovera, E. Y Tassile J. 1995. Posibilidades de riego suplementario en cultivos extensivos de cosecha en la provincia de Córdoba. Proyecto: Sistema de información de suelos de Córdoba. INTA SAGyRR (Cba). 15 pp.
- Hart, W.E. 1972. Subsurface distribution of nonuniformly applied surface water.
- Heermann, D.F. and Hein, R. 1968. Performance characteristics of self-propelled center pivot sprinkler irrigation system”, *Transactions of the ASAE* 11(1): 11-15.
- Iqbal., A., Beaugrand, 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>.
- Jarsun, B.; Bosnero, H. y Lovera, E. 1987. Carta de suelos de la República Argentina. Hoja 3163-32 Oncativo. Plan Mapa de suelos (Ed.).
- Junta de andalucía. 1999. Actualización 2002. Consejería de Agricultura y Pesca, Inventario y Caracterización de los Regadíos de Andalucía. España.
- Keller, J. and Bliesner, R.D.. 1990. Sprinkle and trickle irrigation. Sprinkler and trickle irrigation. AVI Book, Van Nostrand Reinhold, New York, USA.
- 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* ISSN 2151-0032 Vol. 62(5): 1355-1364 <https://doi.org/10.13031/trans.13229>
- Lamm, F.L. and 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)

- Laserna, S. y Montero, J.. 2016. Analisis de riego en sistemas de aspersión semiportail con aspersores de gran tamaño. Presentado en XXXIV Congreso Nacional de Riegos, España.
- Li, J. and Kawano, H. 1996. The areal distribution of soil moisture under sprinkler irrigation. Agricultural Water Management. 32:29-36.
- Lecina, S. y Hill, R.W. 2014. Uniformidad de riego bajo diferentes condiciones socio-económicas: evaluación de pivotes en Aragó (España) y Utah (EEUU).
- Li, J; Rao, M.; 2001. Crop Yield as Affected by Uniformity of Sprinkler Irrigation System (Agrometeorology Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)
- Lovera, E.; Gil, R. y Martellotto, E. 1993. Características edáficas y climáticas del área perteneciente al PAC II- zona centro. EEA INTA Manfredi (Ed.). Argentina.
- 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. and Sadhegi, 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, Iran.
- Montero, J.; Tarjuelo, J.M.; Honrubia, F.T.; Ortiz, J.; Valiente, M. y Sánchez, C. 1999. Influencia de la altura del emisor sobre la eficiencia y la uniformidad en el reparto de agua con equipos pivot. XVII Congreso Nacional De Riegos (AERYD), Murcia (España), mayo de 1999.
- Panigatti J.L. 2010. Argentina 200 años, 200 suelos. Ed. INTA Buenos Aires. 345 pp. Ilustraciones y cuadros.
- Programa de Servicios Agrícolas Provinciales, 2011. No hacemos agua, la encauzamos.
- Quemada M.; Cabrera, M. L. 2001. Characteristic moisture curves and maximum water content of two crop residues. *Plant and Soil*. 238: 295–299, 2002
- Quinn, N.W. and Laflen, J.M. 1983. Characteristics of raindrop troughfall under corn canopy.

- Quinn, N.W. and Laflen, J.M. 1981. Properties of transformed rainfall under corn canopy. *Trans. ASAE* 26:1445-1450.
- Ritchie, S.W. and Hanway, J.J. 1982. How a corn plant develop. Iowa State University of Science and Technology Cooperative Extension Service Ames, Iowa. Special report N° 48.
- Severina, I.; Boccardo, M.; Aimar, F.; Giubergia, J. P.; Haro, R. J.; Salinas, I. 2018. Distanciamiento entre líneas de riego por goteo subterráneo: efectos sobre el crecimiento del cultivo de trigo en la región centro de Córdoba. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_biblioteca_cartilla_digital_18_07_distantamiento_entre_lineas_de_rieゴeo_por_goteo_subterraneo.pdf
- Thapa, R.; Tully K. L.; Cabrera M, Dann C, Schomberg H. H.; Timlin, D.; Gaskin J, Reberg-Horton C, Steven B. Mirsky S. B. 2021. Cover crop residue moisture content controls diurnal variations in surface residue decomposition. *Agricultural and Forest Meteorology* 308-309 (2021) 108537. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108537>.
- Tarjuelo, J.M.; Montero, J.; Carrión, P.A.; Honrubia, F.T. y Calvo, M.A. 1999. Irrigation uniformity with medium size sprinklers. Part II. Influence of wind and other factors on water distribution.
- Tolk, J. A.; Howeel T. A.; Steiner, J. L.; Krieg D. R.; Schneider A. D. 1994 Role of transpiration suppression by evaporation of intercepted water.
- Thompson, A. L.; Martin, D.R.; Norman, J. M. and Towell, T. A. 1996. Scheduling effects on evapotranspiration with overhead and below canopy application. In proceedings of the international conference. Evapotranspiration and irrigation scheduling, 3-6 Nov, 182 – 188. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Unger, P.W. 1991. Organic matter, nutrient and pH distribution in no and conventional tillages semiarid soils. *Agron. J.* 83: 186-191.
- USDA Soil Taxonomy. 1999. Second Edition. A Basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. USDA - Soil Conservation Service Agricultural Handbook N° 436. U.S. Gov. Print. Office, Washington.
- Wesenbeeck, I.J.; K., 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.
- Williams, L. J., & Abdi, H. (2010). Fisher's least significant difference (LSD) test. *Encyclopedia of research design*, 218(4), 840-853.

Zhang, Y1 Ghaly A.E.and Li, B. 2012. Physical Properties of Corn Residues. American Journal of Biochemistry and Biotechnology, 2012, 8(2), 44-53.
doi:10.3844/ajbb.2012.44.53 Published Online 8 (2) 2012
(<http://www.thescipub.com/ajbb.toc>)