

Desempeño de tres métodos de riego por surcos: caudal único, dos caudales y caudal discontinuo en un cultivo de maíz

Génova, Leopoldo; Ricardo Andreau; Pablo Etchevers

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP. Avda. 60 y 119. (1900) La Plata;
hidroagri@agro.unlp.edu.ar

Génova, Leopoldo; Ricardo Andreau; Pablo Etchevers (2014) Desempeño de tres métodos de riego por surcos: caudal único, dos caudales y caudal discontinuo en un cultivo de maíz. Rev. Fac. Agron. Vol 113 (2): 174-191.

El riego complementario de cultivos extensivos ocupa unas 350.000 ha en la región pampeana. Cuando la topografía admite regar por surcos con pendiente sin realizar importantes movimientos de tierra, es una alternativa de la aspersion y del goteo, que implican altos costos de equipamiento y operativos. El riego gravitacional es intrínsecamente menos eficiente que la aspersion y el goteo, pues son inevitables las pérdidas por percolación profunda y por escurrimiento al pie, pero ambas pueden disminuirse con diseño y manejo adecuados y con la instalación de equipos de bajo costo. Este trabajo propone revisar exhaustivamente la bibliografía sobre indicadores de desempeño del riego y evaluar las eficiencias de aplicación (Efa), de aplicación del cuarto inferior (Efaci), de almacenaje (Ealm), de distribución (Efd) y el coeficiente de uniformidad (CU) de tres métodos de riego de maíz por surcos con pendiente. Se realizaron ensayos de caudales y de avance y se diseñaron, operaron y evaluaron los siguientes tratamientos: riego con caudal único T1, riego con dos caudales T2 y riego por pulsos T3, midiendo la humedad edáfica antes y después de regar. Actualmente se discuten los criterios tradicionales de evaluación del desempeño del riego y se están proponiendo nuevos. Se consideran vigentes los empleados en este trabajo para evaluar el riego por surcos en zonas húmedas. Los resultados muestran que el tratamiento T3 superó a T2 y T1 en todos los indicadores, excepto por los valores de Efalm que fueron iguales en los tres tratamientos. Las Efa resultaron para T3 (76,1%), T2 (71,8%) y T1 (49,4%). Las Efci alcanzaron 71,9% para T3, 54,8% para T2 y 32,1% para T1. La uniformidad se evaluó promediando Efd con CU, resultando para T3 (95,2%), T2 (81,5%) y T1 (70,9%).

Palabras clave: riego gravitacional, evaluación de performance, eficiencias y uniformidad de riego.

Génova, Leopoldo; Ricardo Andreau; Pablo Etchevers (2014) Performance of three furrow irrigation methods of corn: single flow, two flows and surge flow. Rev. Fac. Agron. Vol 113 (2): 174-191.

Complementary field crops irrigation was incorporated in the humid pampas region, occupying about 350,000 ha. When the topography supports sloping furrow irrigation without surface conditioning through major soil movements, is an alternative to sprinkler and drip irrigation, which involve high equipment and operating costs. Furrow irrigation is less efficient than sprinkler and drip irrigation, they are unavoidable losses by deep percolation and runoff. However, both losses can be reduced with proper irrigation design and operation and the installation of low-cost equipment. This study aimed to perform a comprehensive literature review of the performance indicators of gravitational irrigation and evaluate application efficiency (Efa), the lower quarter application efficiency (Efaci), storage efficiency (Ealm), distribution efficiency (Efd) and uniformity coefficient (CU) on three furrow irrigation methods. Flows, advance and infiltration test were conducted and designed, operated and evaluated the following treatments: irrigation using one flow T1, irrigation using two flows and surge flow T3, measuring soil moisture before and after irrigation. Although at present the performance evaluation criteria are being discussed and are being proposed new, we consider useful the indicators used in this paper to assess the furrow irrigation performance in humid areas. The surge flow T3 exceeded the others treatments in all indicators, except Efalm that was equal in all treatments. The Efa resulted on T3 (76.1%), T2 (71.8%) and T1 (49.4%). The Efci reached 71.9% on T3, 54.8% on T2 and 32.1% on T1. The uniformity was evaluated by averaging Efd with CU, resulting on T3 (95.2%), T2 (81.5%) and T1 (70.9%).

Keywords: gravitational irrigation, performance assessment, irrigation efficiencies and uniformity.

Recibido: 23/06/2014

Aceptado: 29/01/2015

Disponible on line: 01/03/2015

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCION

En la región pampeana húmeda, el cultivo de maíz presenta una excelente respuesta fisiológica al riego complementario, incrementando más del 50% su rendimiento respecto al secano, pero la respuesta económica y financiera está fuertemente asociada al costo total de riego, dependiente del método de aplicación del agua (Génova, 1994a; 1994b; 1995), siendo los más difundidos los gravitacionales por surcos y la aspersión de movimiento continuo, mayoritariamente equipos de pivote central (PROSAP, 2006).

El riego complementario abarca en la actualidad unas 350.000 ha en la región pampeana, siendo la superficie total irrigada en la Argentina de alrededor de 2,2 millones de ha, que si bien representa el 7% del área cultivada total, contribuye con el 20% del valor bruto de producción agropecuaria nacional (Zappi, 2012).

La modalidad de riego complementario, impone el mantenimiento de la topografía original de los lotes destinados a la producción agrícola bajo riego, por lo que el costo total de riego no incluye el acondicionamiento superficial del terreno sino el relevamiento planialtimétrico, más detallado para construir los surcos que para instalar equipos de pivote central o avance frontal (Génova, 1994a).

Debido al alto precio tanto del equipamiento de aspersión continua como de la energía para presurizarlo, cuando la microtopografía de los lotes agrícolas es adecuada, con pendientes uniformes menores al 1,2 % (Génova 1994b), el riego gravitacional por surcos constituye una alternativa con viabilidad tecnológica, económica y financiera, más accesible para productores de pequeños y medianos recursos. Existen varios métodos de diseño y operación de riego por surcos, los tradicionales que utilizan un caudal único, otros que proponen el manejo de dos o más caudales operados manualmente, que requieren un diseño específico y un método con mayor incorporación de tecnología y equipamiento que permite aplicar intermitentemente un mismo caudal, pero en forma discontinua, denominado riego por pulsos (Walker & Scogerboe, 1987; P&R, 2013).

Los avances en el desarrollo de la tecnología de riego por surcos desde mediados del siglo pasado, se han basado en la disminución del tiempo de oportunidad de la infiltración en la cabecera de las unidades de riego, para minimizar las pérdidas de agua por percolación profunda y por salida del escurrimiento en el pie de surcos no endicados, con el diseño de caudales y tiempos de aplicación y longitudes de surcos adecuados a las condiciones agronómicas, hidrológicas e hidráulicas existentes. Los métodos de riego fueron mejorándose desde la derivación de un caudal continuo único máximo no erosivo QMNE durante el tiempo total de riego (USDA, 1973), pasando al uso de 2, 3 y hasta 5 caudales continuos (USDA, 1984), tratando de ajustar las tasas de aplicación de agua a las tasas decrecientes de la velocidad de infiltración del suelo, llegando a la utilización de un único caudal pero derivado discontinuamente, generando ciclos o pulsos de entrega de agua (Walker & Scogerboe, 1987; P&R, 2013). Se han logrado en las últimas 4 décadas mejoramientos en el diseño, operación y evaluación del

riego gravitacional, utilizando programas computacionales de modelación hidráulica. Losada Villasante y Roldan Cañas (2009) manifestaron que dichos modelos y sus aplicaciones pueden ser usados en el manejo del riego en tiempo real. Dos de los más difundidos son el SIRMOD (Walker, 1993; 2003) y el WinSRFR (USDA, 2009).

El desarrollo tecnológico del riego gravitacional fue acompañado por sucesivos criterios y métodos para construir parámetros de desempeño o indicadores, referidos generalmente a conceptos de eficiencia y de uniformidad de riego. El término eficiencia es definido como la relación entre el trabajo útil realizado y la energía total gastada (Turner, 1987). Esta relación se puede expresar como un porcentaje y se aplica a cualquier sistema.

Christiansen (1942) elaboró la primera ecuación de eficiencia de distribución para evaluar el grado de uniformidad del riego por aspersión, que denominó Coeficiente de Uniformidad (CU), Criddle et al. (1956) determinaron la uniformidad de distribución (UD) relacionando la lámina mínima respecto de la lámina media infiltrada. Israelsen y Hansen (1965), definieron los rendimientos de aplicación, de utilización, de almacenamiento, de distribución y de evapotranspiración del agua. Merriam et al. (1973) calcularon la eficiencia de aplicación potencial como la factible de alcanzar cuando la lámina media infiltrada y almacenada es coincidente con la lámina de reposición óptima u objetivo.

Chambouleyron (1977) diferenció eficiencias externas, que ocurren en la red de riego, de las eficiencias internas, que ocurren en las parcelas agrícolas. Definió la eficiencia de conducción interna como la relación entre el caudal recibido en la parcela regada, respecto del caudal derivado en la bocatoma de la finca y la eficiencia de riego interna como el producto de la eficiencia de aplicación y la eficiencia de conducción interna.

ASCE (1978) elaboró y difundió un primer estándar internacional sobre términos y conceptos de la performance de métodos de riego, que generó varias publicaciones sobre uniformidad y eficiencia.

Merriam y Keller (1978), definieron la uniformidad de distribución como la relación del promedio de la lámina infiltrada en el cuarto más perjudicial, respecto de la lámina media infiltrada y la uniformidad de distribución absoluta como la relación entre la lámina mínima respecto a la promedio infiltrada.

Walker y Skogerboe (1987), que propusieron el cálculo de dos indicadores que permiten separar las pérdidas por percolación profunda y por escurrimiento al pie. El % de percolación profunda es la relación entre el volumen de agua percolado respecto del volumen de agua aplicado y el % de escurrimiento al pie es la relación del volumen de agua escurrido respecto del volumen de agua aplicado.

Bos y Nugteren (1990) definieron las eficiencias para todo el sistema de riego, considerándolas desde la fuente de agua hasta el cultivo. Dividieron al sistema en tres secciones: conducción, distribución y aplicación. La conducción implica el movimiento del agua desde su fuente hasta los canales primarios y secundarios. La distribución de agua implica su conducción en los canales terciarios, cuaternarios e internos de la

propiedad y la aplicación comprende el movimiento del agua desde su entrada a la parcela hasta el cultivo. Wolters (1992) resumió varios términos de eficiencias de la literatura internacional dividiéndolos en dos grandes grupos, uno basado en volúmenes y el otro basado en láminas medidas.

Keller y Keller (1995) definieron la eficiencia de riego efectiva como la relación del uso consuntivo del agua aplicada al cultivo respecto al uso efectivo de la misma. De este trabajo se desprenden las publicaciones de (Willardson et al., 1994; Seckler, 1996; Allen et al., 1996; Seckler et al., 1998 y Willardson y Allen, 1998, todos mencionados por Jensen, 2007), sugiriendo que el término eficiencia es muy ambiguo, recomendando el uso de relaciones o fracciones para definir el uso del agua.

Burt et al. (1997) revisaron y redefinieron los términos de eficiencia y uniformidad, afirmando que son propuestas intuitivas para valorar la bondad de riego, mejorando las enunciaciones de los parámetros de desempeño con el objetivo de evitar confusiones y errores de cálculo, actualizando los estándares internacionales. Los parámetros de desempeño se actualizan en función del balance hídrico considerando la partición física del agua aplicada, en función de su capacidad de re-uso y finalmente de su juicio de uso, de forma tal que se definen en el balance hídrico: usos consuntivos, no consuntivos, benéficos, no benéficos, razonables y no razonables. Por último propusieron los siguientes parámetros de desempeño: eficiencia de riego, coeficiente de uso consuntivo de riego, sagacidad del riego, uniformidad de distribución, eficiencia de aplicación, adecuación del riego en el cuarto más perjudicado, argumentando que poseen una adecuada consistencia entre diferentes métodos de riego, incluso tomando diferentes escalas.

Grassi (1998; 2000) conceptualizó tanto la utilización racional del agua como su empleo en actividades agroproductivas que optimicen el beneficio a obtener de los recursos invertidos, e impliquen manejar adecuadamente las cantidades y oportunidades de riego, para disminuir las pérdidas y desperdicios de agua.

Feyen y Zerihun (1999) definieron dos tipos de variables físicas determinantes del resultado de un riego: las variables de manejo, cuyos valores dependen de la operación del regante y las variables del sistema, que al ser parámetros físicos inherentes al sistema, sus valores no admiten modificaciones de importancia. Las variables de manejo son: caudal unitario, caudal de manejo, tiempos de riego y longitud de la unidad de riego. Las variables del sistema son: forma geométrica del surco, lámina neta de reposición, QMNE, pendiente y coeficiente de rugosidad del terreno y los parámetros de la ecuación de infiltración.

Dalton y Raine (1999), considerando que el objetivo principal de la gestión de cualquier sistema del mundo real es maximizar su eficiencia, minimizando las diversas pérdidas o ineficiencias del sistema, indicaron que existen varios problemas en el intento de definir la eficiencia de un sistema de riego, siendo los más comunes la carencia o insuficiencia de especificaciones de las condiciones de frontera temporales y espaciales que definen el sistema a evaluar y las dificultades para definir las variables de salida del agua apropiadas.

Volumétricamente, la eficiencia del sistema regado debe ser determinada como la relación entre el agua utilizada por las plantas y el total de agua suministrada. Sin embargo, tanto la entrada como la salida de agua pueden definirse en diversos sitios y en un amplio rango de escalas de tiempo. Mientras que el volumen de agua salido del sistema de riego es el agua usada por las plantas, el volumen de agua salido de todo el sistema de producción, es referido comúnmente a la cosecha comercial o la rentabilidad económica. Por lo tanto, si bien es posible argumentar que la eficiencia de agua no debe ser definida en términos de rendimiento de los cultivos regados o de valor obtenido, estos indicadores brutos suelen ser los de mayor interés práctico para los regantes.

Morábito (2003) definió las eficiencias de aplicación potencial según dos criterios: el manejo del método de riego y el balance salino del suelo.

La evaluación del desempeño de un método de riego tiene como principal objetivo su optimización e incluye la observación, registro e interpretación de las actividades relacionadas con el riego (Bos et al., 2005). Los ensayos de campo para evaluar los métodos de riego son necesarios para definir cuantitativamente su desempeño, no solamente en relación con las variables físicas del sistema, sino también con relación a su diseño y manejo (Walker, 1989).

Jensen (2007) manifestó que el término eficiencia de riego tradicional sirvió como un propósito válido durante casi un siglo asistiendo a los ingenieros para diseñar mejores sistemas de riego y a los especialistas para el desarrollo de una mejor gestión de prácticas de riego y todavía tiene utilidad para los ingenieros de diseño sistemas de riego. Sin embargo, dicho término no debería llamarse eficiencia, ya que implica incorrectamente que el componente de agua no consumida en la ecuación de balance de agua significa una pérdida de agua y considera más exacto referirse a la fracción de uso consuntivo o al coeficiente de uso consuntivo. Indicó que la fracción no consumida debería tenerse en cuenta al planificar y gestionar sistemas de recursos hídricos a nivel de cuencas o de grandes proyectos que captan y reutilizan los flujos de retorno.

Schilardi et al. (2010) manifestaron que actualmente la comunidad científica internacional sigue revisando y discutiendo el término eficiencia, proponiendo para el mejor entendimiento del manejo racional del recurso agua, los términos rendimiento o desempeño. Conceptualmente, el fin último del desempeño dependerá de la optimización sustentable de la producción para cumplir con los objetivos básicos de toda empresa agrícola: lucro y continuidad.

Pereira, et al. (2012) advirtieron que existen algunas dificultades en la discusión de la productividad y la eficiencia del agua, porque muchos términos se utilizan con poco rigor e incluso como sinónimos, por lo que proponen nuevos indicadores que incluyen la consideración de la reutilización del agua, con el objetivo de ayudar a identificar y proporcionar una clara distinción entre los usos del agua benéficos y no benéficos. Según Lankford (2012), la comunidad científica está cuestionando los conceptos sobre eficiencias del riego como una medida útil de la performance del riego.

En Mendoza (Argentina) se realizaron varias investigaciones evaluativas del desempeño de los sistemas regados, todas coincidentes en reportar bajas eficiencias de aplicación. Para Bos y Chambouleyrón (1998) los sistemas de riego mendocinos alcanzan eficiencias de aplicación cercanas al 40%, atribuyendo dicho valor al hecho de ser tradicionales (riego por gravedad), no muy bien manejados.

En Arroyo Claro, Departamento Tunuyán (Oasis Centro), Salatino et al. (1992) obtuvieron para riego por surcos y melgas valores del orden del 38%, 86% y 71% para eficiencias de aplicación, almacenaje y distribución, respectivamente. Morabito et al. (2007), estudiando el desempeño de los sistemas regados en el Río Mendoza (Oasis Norte), reportaron una eficiencia de aplicación actual media del 59%.

Vallone et al. (2007) manifestaron: (1) que el área total bajo riego en la Argentina permanece prácticamente estancada alrededor de 1.300.000 ha, muy por debajo del área potencialmente irrigable, estimada en 2.500.000 ha y (2) que se mantienen los problemas endémicos como bajas eficiencia (35-40% en promedio para el país) y baja productividad del agua utilizada. Estas bajas eficiencias se deben principalmente a la obsolescencia de los sistemas de conducción y aplicación del riego a nivel de finca, a la desactualización de la operación y organización de los sistemas colectivos de riego y a la falta de actualización técnica de los recursos humanos involucrados.

Romay y Morabito (2000) y Romay (2010) afirman que el riego por pulsos logró en la mayoría de los casos estudiados duplicar la eficiencia de aplicación respecto del riego tradicional, sin encontrar diferencias en las eficiencias de almacenamiento y distribución.

Schilardi (2011) evaluó el desempeño de sistemas regados de la Cuenca del Río Tunuyán Superior, encontrando bajos valores de eficiencia de aplicación (43%) y valores adecuados de eficiencias de conducción, almacenaje y distribución (91 %, 99% y 91% respectivamente), coincidentes con los reportados en varias investigaciones extranjeras sobre evaluaciones de métodos tradicionales de riego. Asimismo el autor concluye que la expectativa de alcanzar una eficiencia de aplicación potencial sería del orden del 68%, con el mejoramiento del manejo del riego en finca.

Romay y Génova (2011) determinaron que la reprogramación de los tiempos de los ciclos de avance y remojo, modificando la programación de la válvula P&R con el dato único del tiempo de avance, mejoró la eficiencia de aplicación del riego con caudal discontinuo debido a la reducción de las pérdidas por percolación profunda y por escurrimiento al pie.

Morabito et al. (2012) revisaron ampliamente la bibliografía sobre indicadores de uso del agua, analizaron las definiciones tradicionales de eficiencia de riego y las enriquecieron introduciendo nuevos conceptos y relaciones que diferencian los usos beneficiosos y no beneficiosos, racionales y no racionales del agua de riego. Comparando parámetros de eficiencias de riego calculadas en forma tradicional con las introducidas por Burt et al. (1997), entre otros, encontraron que con esta última metodología en las áreas de influencia de los ríos Mendoza y Tunuyán inferior, se alcanzan valores de eficiencia de riego a

nivel de parcela 30 % más altos que los tradicionales. La eficiencia de aplicación resultó media para la cuenca del río Tunuyán inferior (67%), baja para el río Mendoza (59 %) y aun más baja para el Tunuyán superior (43 %). Concluyeron que es necesario continuar trabajando para mejorar el aprovechamiento del agua de riego, tanto en la conducción como en la aplicación intrafinca y tomar en cuenta que muchas fracciones de agua asumidas tradicionalmente como pérdidas, forman parte del proceso productivo.

Tozzi et al. (2012), citados por Morabito et al. (2012) reportaron para la cuenca del río Tunuyán inferior valores de eficiencias de conducción interna, de aplicación, de almacenaje y de distribución del 91%, 66%, 95% y 94% respectivamente, mencionando que la eficiencia de aplicación potencial a alcanzar en la zona, mejorando el manejo del riego en finca, sería del 86%.

Evaluando performances de riegos por surcos en Mendoza, operados tradicionalmente y con caudal discontinuo, Romay et al. (2012) informaron que considerando el manejo realizado por el operario regador, el riego por pulsos en surcos sin pendiente alcanzó valores de eficiencia de aplicación del 79%, superando al riego tradicional sin pendiente (69%) y con pendiente (29%). Por el contrario no se observaron diferencias significativas en las eficiencias de almacenaje ni de distribución. Modificando los tiempos de aplicación en conjunto con caudales de riego, se optimiza la operación de riego, aumentando las eficiencias. Concluyó que existe una brecha muy grande entre las eficiencias medidas a campo y las potenciales, atribuida a la subutilización de los equipos de riego tecnificados, debida a la inadecuada capacitación del regante.

En Cruz del Eje, Pcia. de Córdoba, Roque (2003) concluyó que combinando las técnicas de siembra directa y riego por pulsos se obtuvo una mayor uniformidad de distribución de la humedad en el perfil mojado de surcos, comparándola con la obtenida en riego tradicional.

Génova (1994 b) trabajando en maíz en Salto, Pcia. de Buenos Aires, encontró que derivando dos caudales a los surcos, se lograron eficiencias de aplicación del 72% y de almacenaje del 100% (estos valores no pueden generalizarse, ya que fueron obtenidos en tres operaciones de riego bien controladas en cada campaña agrícola, dimensionadas en base a ensayos de campo, lo cual aún no es frecuente en las prácticas de riego que aplican actualmente los productores).

Dado que en este trabajo se propuso revisar los criterios de evaluación del desempeño de sistemas de riego gravitacionales y luego aplicar metodologías de evaluación de tres métodos de riego diferenciados por la derivación de caudales continuos (caudal único y dos caudales) y caudal discontinuo (riego por pulsos), utilizando indicadores de eficiencias e uniformidad, basados en la hipótesis de que, a medida que se fracciona la entrega del caudal, disminuyen las pérdidas de agua y aumenta la uniformidad de aplicación. Es conveniente mencionar que la calificación propuesta por Roscher (1985), permite analizar situaciones particulares y clasificarlas según los parámetros de desempeño más importantes a considerar en el riego por superficie.

Tabla 1. Calificación de eficiencias de aplicación EAP, almacenaje EAL y distribución EDI en parcela para métodos de riego por superficie (Roscher, 1985)

Eficiencias	Calificación		
	Mala	Satisfactoria	Buena
EAP	< 60 %	60-75 %	> 75 %
EAL	< 80 %	80-90 %	> 90 %
EDI	< 80 %	80-90 %	> 90 %

MATERIALES Y METODOS

Se realizó el levantamiento planialtimétrico a nivel de detalle (Salgado et al., 2012) y definieron las pendientes longitudinales de un lote de 2 ha existente en la Estación Experimental J. Hirschhorn EEJH de la Universidad Nacional de La Plata, ubicada en Los Hornos, Partido de La Plata. Fueron extraídas 10 muestras compuestas del suelo Argiudol típico en tres profundidades (0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm) y se midió la densidad aparente (dap) en 4 sitios y tres profundidades, con el método del cilindro. Luego se preparó el terreno con la modalidad de siembra directa y el 15-10-2012 se sembró maíz con una densidad de 80.000 plantas.ha⁻¹. A fines de noviembre se construyeron surcos espaciados 0,7 m y delimitaron tres sectores donde se condujeron los ensayos de campo requeridos para diseñar tres métodos de riego gravitacional, que constituyeron los siguientes tratamientos: T1 caudal único; T2 dos caudales y T3 caudal discontinuo. Se caracterizaron los contenidos hídricos referenciales con el método de Richards (1954) y se estimó la lámina neta de reposición mediante el método edafológico (ec. 1), utilizando un umbral crítico o de riego del 50%.

$$dn = (Wc - Wm) \text{dap} \cdot \text{Ur} \cdot D \quad (\text{ec. 1}) \quad \text{donde:}$$

dn= lámina neta, en mm.

Wc= contenido hídrico a capacidad de campo, en % gravimétrico.

Wm= contenido hídrico de marchitez permanente, en % gravimétrico.

Ur= umbral de riego, en fracción decimal.

dap= densidad aparente, g.cm³.

D= profundidad del estrato de suelo ocupado con el 70% de raíces activas, en dm.

Se calculó el intervalo de riego aplicando la ec. 2.

$$I_r = dn \cdot \text{Etc}^{-1} \quad (\text{ec. 2}) \quad \text{donde:}$$

I_r= intervalo de riego, en días.

Etc= evapotranspiración del cultivo de maíz, en mm.d⁻¹.

La evapotranspiración del maíz se estimó utilizando la evapotranspiración de referencia (Eto) obtenida con el método de Penman-Monteith y datos de la Estación Meteorológica Davis instalada en la EEJH, operada mediante el Programa Cropwat (FAO, 2010) y

coeficientes de cultivo kc de 0,8, 1,0, 1,2 y 0,8 para los meses de noviembre a febrero, respectivamente.

Para diseñar los métodos de riego por surcos se estimaron los caudales máximos no erosivos mediante los modelos de Criddle et al. (1956) (ec.3) y de Hamad y Stringham (1978) (ec. 4).

$$QMNE = 0,63 \cdot s^{-1} \quad (\text{ec. 3}) \quad \text{donde:}$$

QMNE= caudal máximo no erosivo, en l.s⁻¹
s= pendiente longitudinal, en m.m⁻¹

$$QMNE = a \cdot s^b \quad (\text{ec. 4}) \quad \text{donde:}$$

QMNE= en l.s⁻¹

a= factor en función de la textura del suelo, en l.s⁻¹

b= exponente en función de la textura del suelo.

Para seleccionar visualmente los QMNE fueron conducidos ensayos de caudales, derivando 6 caudales, tres inferiores y tres superiores a los estimados con los modelos para las pendientes de los conjuntos muestrales de surcos correspondientes a cada tratamiento. Con los QMNE seleccionados se caracterizó el avance, cronometrando el arribo del flujo de escurrimiento a cada estaca (espaciadas 25 m entre sí) desde la cabecera hasta el pie de los surcos y se ajustaron los datos de distancia recorrida y tiempo al modelo de Fox-Bishop (1965) mediante regresión lineal simple RLS. Con el método de surcos infiltrómetros se midieron velocidades y tiempos de infiltración acumulados y construyeron las ecuaciones que caracterizan la infiltración ajustando los datos mediante RLS al modelo de Kostiakov (1932).

El diseño de riego por surcos con un solo caudal, se realizó utilizando la ec. 5.

$$Q \cdot t = dn \cdot A \quad (\text{ec. 5}) \quad \text{donde:}$$

t= tiempo de avance, en segundos.

A= área del surco, en m².

Q= caudal=QMNE, en m³.s⁻¹

El diseño del riego por surcos con dos caudales, se realizó aplicando la metodología del USDA (1984) adaptada por Génova (1995), utilizando un primer caudal (el QMNE) durante un tiempo de avance, estimado como la cuarta parte del tiempo de infiltración y un caudal de infiltración (Q_i=QMNE.2⁻¹) para derivarlo durante el tiempo de infiltración t_i. La lámina total derivada dd se calculó mediante la ec. 6

$$dd = \{(QMNE \cdot t_a) + (Q_i \cdot t_i)\} \cdot A^{-1} \quad (\text{ec. 6}) \quad \text{donde}$$

dd= lámina total derivada, en m.

QMNE= caudal máximo no erosivo, en m³.s⁻¹

t_a= tiempo de avance, en s.

t_i= tiempo de infiltración, en s.

El diseño del riego por surcos con caudal discontinuo se basó en un ensayo de avance, que proporcionó el dato del tiempo de avance, con el cual se programó la válvula P&R para operar el riego por pulsos. La dd a los surcos se calculó aplicando la ec. 7

$$dd = \sum (QMNE \cdot tpi) A^{-1} \quad (\text{ec. 7}) \quad \text{donde}$$

tpi = tiempo de cada pulso o ciclo de riego, en s.

Se aplicaron los riegos de acuerdo a las variables definidas para cada tratamiento y el 23 de diciembre de 2013, se midió la humedad volumétrica del suelo (Wv en %), antes y después de cada riego, mediante sensores Decagon, ubicados a tres profundidades del perfil (0,1m, 0,3m y 0,5m) en 18 sitios a lo largo del surco, desde la cabecera al pie, espaciados 10 m entre sí para el caso de T1 y T2 y 16 sitios para T3. Los datos de humedad de suelo se transformaron primero en láminas de agua por profundidad de suelo (dm) en mm.dm⁻¹ y luego en láminas de agua (di) para cada estrato i de 2 dm de espesor, para calcular las láminas atribuibles al riego mediante la diferencia entre las di medidas antes y después del riego para cada estrato y finalmente las láminas almacenadas d como consecuencia del riego para cada sitio, en la profundidad total del suelo ocupado por raíces, de 6 dm, sumando las di de los tres estratos.

Con los datos medidos y las láminas d, dn y dd calculadas con las ec.1, 6 y 7, se evaluaron las eficiencias de aplicación, de aplicación del cuarto inferior, de almacenaje, de distribución y el coeficiente de uniformidad, siguiendo las metodologías de Walker y Scogerboe (1987), Burt et al. (1997) y Jensen (2007).

Las distintas eficiencias se calcularon como sigue:

(1) aplicación (ec. 8)

$$Efa = 100 (dm.dd^{-1}) \quad \text{donde:}$$

Efa= eficiencia de aplicación, en %.

dm = lámina media almacenada en la zona de raíces, en mm.

dd = lámina total derivada, en mm.

(2) aplicación del cuarto inferior (ec. 9)

$$Efaci = 100 (dmci.dd^{-1}) \quad \text{donde:}$$

dmci= lámina promedio almacenada en la zona de raíces correspondiente al 25% de los menores valores hallados.

Efaci= eficiencia de aplicación del cuarto inferior, en %.

(3) almacenaje (ec. 10)

$$Efalm = 100 (dm.dn^{-1}) \quad \text{donde:}$$

Efalm= eficiencia de almacenaje, en %.

dn= lámina neta, en mm.

(4) distribución (ec. 11).

$$Efd = 100 (dmci.dm^{-1}) \quad \text{donde:}$$

Efd= eficiencia de distribución, en %.

La uniformidad de distribución, también denominado coeficiente de uniformidad, se evaluó mediante la ec. 12.

$$CU = 100 [1 - (\sum(d-dm) (n.dm)^{-1})] \quad \text{donde:}$$

CU = coeficiente de uniformidad, en %.

d = láminas almacenadas en la zona de raíces.

n = número de láminas almacenadas en la zona de raíces

dm = lámina media almacenada en zona de raíces.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 2 se muestran los datos de las variables del suelo y en la Tabla 3 la lámina total almacenada.

La Figura 1 presenta las curvas de nivel del lote, con las que se definieron las pendientes de los conjuntos de surcos muestrales (T1 y T2 del 0,3% y T3 del 0,34%).

Riego por surcos derivando un solo caudal.

Para T1, la estimación del QMNE según Criddle et al. (1956) fue de 2,1 L.s⁻¹ y según Hamad y Stringham (1978) de 1,9 L.s⁻¹ (Figura 2). La observación del escurrimiento en los surcos de 6 caudales entre 1,3 y 2,3 L.s⁻¹, permitió seleccionar un QMNE= 1,7 L.s⁻¹.

Tabla 2. Parámetros de suelo del ensayo: contenidos hídricos referenciales y densidad aparente. Referencias: dap= densidad aparente; Ws= contenido hídrico a saturación; Wc= contenido hídrico a capacidad de campo; Wm= contenido hídrico en punto de marchitez permanente; Walm= capacidad de almacenaje de humedad del suelo

Profundidad	cm	00- 20	20-40	40-60
dap	g.cm ⁻³	1,22	1,24	1,21
Ws	%	56,0	58,0	58,0
Wc	%	29,8	30,2	32,1
Wm	%	15,2	16,1	16,8
Walm	%	14,6	14,1	15,3

Tabla 3. Estimación de la lámina total almacenable.

Profundidad (cm)	0-20	20-40	40-60	00-60
Láminas (mm)	17,81	17,48	18,51	53,81
Lámina neta de reposición (mm)	53,8			

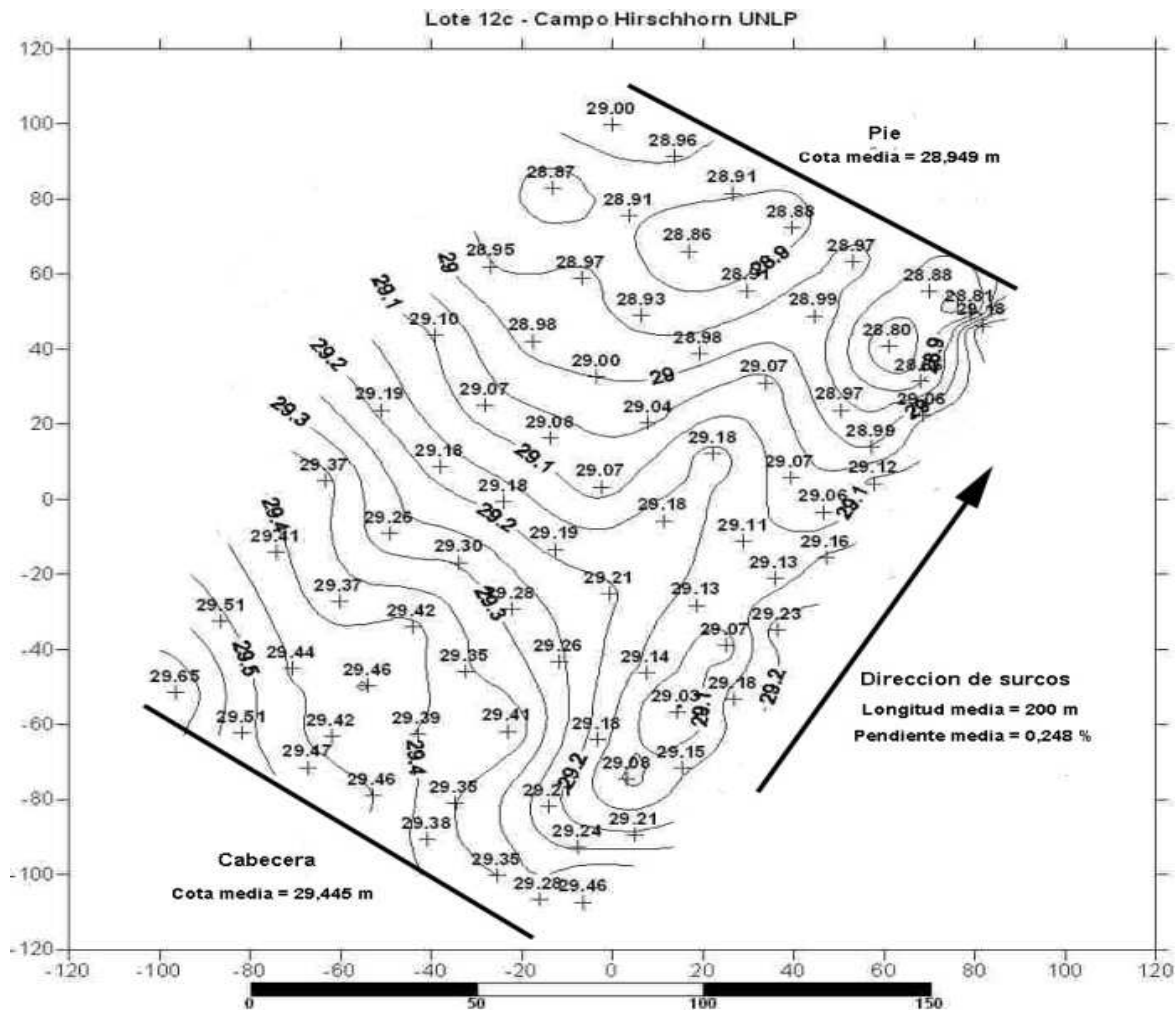


Figura 1. Curvas de nivel del lote del ensayo. Fuente: Salgado et al. (2012)

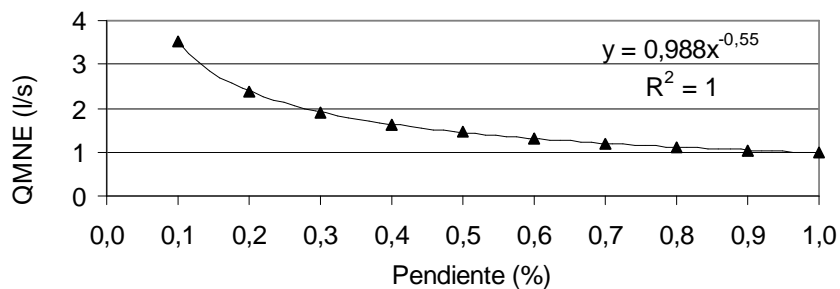


Figura 2. Caudal máximo no erosivo (QMNE) en función de la textura arcillo-limosa del suelo y pendiente, según Hamad y Stringham (1978).

La Tabla 4 muestra los registros del avance del flujo en los surcos muestrales para el QMNE seleccionado, resultando un tiempo total medio de 193 minutos para recorrer 175 m entre cabecera y pie de surcos. En la Figura 3 se observa la gráfica de la ecuación de avance:

$$D(m) = 7,66 t^{0,589}(\text{min}).$$

Tabla 4. Ensayo de avance del flujo en los surcos Para el T1 con un solo caudal (1,7 L.s⁻¹)

Distancia (m)	Surco 1 Tiempo (min)	Surco 2 Tiempo (min)	Surco 3 Tiempo (min)	Promedio Tiempo (min)
25	9	5	7	7
50	33	19	22	25
75	64	40	40	48
100	96	78	69	81
125	135	115	104	118
150	171	150	151	157
175	214	177	187	193

La operación del riego por surcos con caudal único se realizó derivando un QMNE=1,7 L.s⁻¹ durante 193 minutos, volumen que se distribuyó en un área A=119 m², generada por la longitud de surco L=170 m y espaciado e=0,7 m, totalizando una dd=165 mm. Los valores de humedad de suelo (Wv %) registrados antes y después del riego se observan en la Tabla 5. Los valores de Wv% del estrato superficial antes del riego presentaron un coeficiente de variación (CV) mayor que los estratos más profundos y los registrados después del riego, fueron más desuniformes, pero similares entre sí. La lámina media almacenada fue de 81,8 mm, con un CV del 32% y las láminas almacenadas a lo largo del surco se ven en la Figura 4, destacándose que las mayores pérdidas por percolación profunda ocurrieron en la cabecera y el déficit de riego en el pie. En la Tabla 6 constan los valores de las eficiencias de riego logradas, que siguiendo a Roscher (1985) califican como "mala" la aplicación, "bueno" el almacenaje y "mala" la distribución.

Riego por surcos derivando dos caudales.

Para la operación de riego con dos caudales (T2) se obtuvieron las siguientes variables: L, e, A, QMNE y dn, de igual modo que para T1, ta= 48 min; ti=145 min; Qi=0,85 L.s⁻¹. En la Tabla 7 se presentan los valores de cálculo y los resultados de las láminas derivadas con los distintos caudales durante los tiempos de avance e infiltración.

La Tabla 8 contiene los datos de las mediciones de las humedades volumétricas antes y después del riego y la Tabla 9 muestra las láminas almacenadas como resultado de la aplicación de dos caudales.

En la Figura 5 se grafican las láminas almacenadas a lo largo del surco durante el riego operando dos caudales y la Tabla 10 presenta los respectivos valores de eficiencias que resultan, según la escala de Roscher (1985), "satisfactorias" para la aplicación y distribución y "buenas" para el almacenaje.

Riego por surcos con caudal discontinuo (riego por pulsos).

El sector del lote regado por pulsos presentó una pendiente longitudinal del 0,34%, con la cual se estimó el QMNE=1,79 L.s⁻¹ con el modelo de Criddle (1956) y QMNE=1,79 L.s⁻¹ con el modelo de Hamad y Stringham (1978). Con el ensayo de 6 caudales de 0,9; 1,1; 1,3; 1,5; 1,7 y 1,9 L.s⁻¹ se seleccionó el QMNE=1,3 L.s⁻¹ y se condujo el ensayo de avance, cuyos resultados figuran en la Tabla 11. En la Figura 6 se ve graficada la ecuación de avance, que resultó:

$$D(m)=8,936 t^{0,59}(\text{min}).$$

La operación del riego por pulsos se diseñó a partir de la programación de la válvula P&R con un tiempo de avance asumido de 150 minutos, que determinó 3 ciclos de avance, de 18, 24 y 33 minutos para los ciclos primero, segundo y tercero, respectivamente y 3 ciclos de remojo, de 11 minutos cada uno, totalizando un tiempo de riego de 108 minutos. Los surcos de 170 m de longitud, espaciados 0,7m, conformaron un área de 119 m². El caudal de bombeo disponible Q=71 m³.h⁻¹ permitió abrir 15 compuertas para regar 15 surcos con el QMNE=1,3 L.s⁻¹. La Tabla N° 12 muestra el cálculo de volúmenes y la lámina total aplicada.

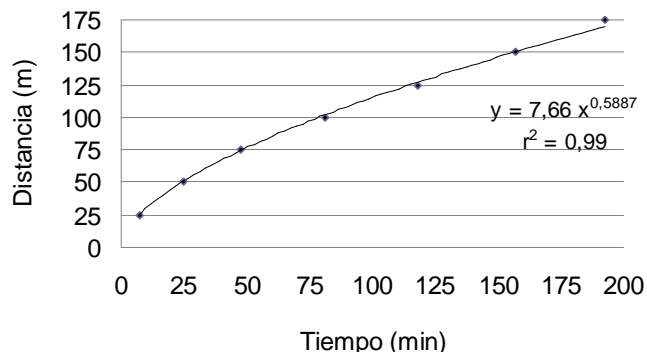


Figura 3. Curva de avance para T1 con caudal único de 1.7 Ls⁻¹.

Tabla 5. Humedades volumétricas de suelo medidas antes y después del riego para el T1 con un solo caudal (1.7 L.s⁻¹)

Distancia m	Profundidad 0,1 m		Profundidad 0,3 m		Profundidad 0,5 m	
	W antes %	W después %	W antes %	W después %	W antes %	W después %
0	12,9	35,2	18,1	36,2	19,1	36,2
10	12,1	35,4	18,8	35,8	19,3	35,9
20	13,8	35,2	19,1	36,3	19,0	36,0
30	12,9	33,9	18,8	35,8	18,9	33,2
40	12,5	33,3	17,2	35,6	18,2	31,1
50	13,2	28,2	17,7	35,1	18,7	32,3
60	11,8	29,4	18,1	34,4	18,3	34,5
70	13,2	30,3	18,9	33,0	19,4	29,1
80	12,4	26,7	18,4	34,1	18,6	28,1
90	13,3	28,9	17,1	34,6	19,1	27,7
100	12,9	26,0	18,0	33,3	18,0	23,1
110	12,8	28,0	17,2	31,3	17,6	25,2
120	13,2	26,6	17,7	29,0	19,2	23,5
130	12,8	27,3	17,2	28,5	17,6	28,5
140	13,2	25,3	18,2	29,3	18,2	25,1
150	13,5	24,7	18,4	28,9	18,6	26,2
160	13,0	24,1	17,9	27,1	18,9	24,2
170	13,2	22,2	18,1	25,3	19,1	25,4
Promedio	12,9	28,9	18,1	32,4	18,7	29,2
CV %	10,0	16,0	3,4	14,3	3,0	17,8

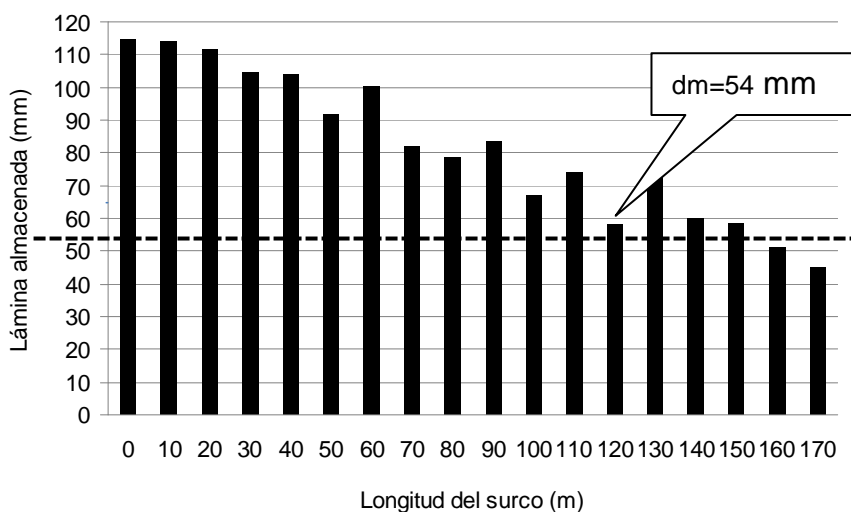


Figura 4. Láminas almacenadas en zonas de raíces para el T1 caudal único

Tabla 6. Eficiencias de riego logradas para T1 con caudal único ($1,7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$)

Aplicación	Aplicación 1/4 inferior	Almacenaje	Distribución	Coefic. de uniformidad
Efa (%)	Efci (%)	Efalm (%)	Efd (%)	CU (%)
49,4	32,1	100,0	76,9	65,0

Tabla 7. Láminas aplicadas durante los períodos de avance y de infiltración derivando dos caudales, uno de avance $Q_{MNE} = 1,7 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ y otro de infiltración $Q_i = 0,85 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$

Tiempo (min)	Tiempo (s)	Caudales ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Vol aplicado (m^3)	Area (m^2)	Lámina aplicada (m)	Lámina aplicada (mm)
Avance	2895	0,0017	4,92	119	0,041	41
Infiltración	8685	0,00085	7,38	119	0,062	62
Total	11580		12,30	119	0,103	103

Tabla 8. Humedad volumétrica medidas antes y después de regar con dos caudales. T2.

Distancia m	Profundidad 0,1 m		Profundidad 0,3 m		Profundidad 0,5 m	
	W antes %	W después %	W antes %	W después %	W antes %	W después %
0	13,2	31,2	18,3	32,2	19,3	35,2
10	14,3	32,4	18,2	32,8	20,4	34,1
20	13,0	32,2	19,1	31,3	19,5	33,8
30	13,2	31,9	18,6	33,8	20,3	32,2
40	12,8	28,2	17,9	34,6	20,7	28,3
50	13,5	29,0	17,7	33,1	22,0	30,1
60	12,0	30,0	18,2	30,4	21,0	27,2
70	13,4	27,2	18,6	31,4	22,0	31,4
80	12,6	26,7	18,9	30,1	18,1	30,5
90	11,7	22,1	17,1	32,6	19,1	29,3
100	13,1	29,8	18,0	28,3	18,0	29,8
110	13,0	24,6	19,2	28,3	19,4	28,9
120	11,9	26,6	17,7	28,2	19,7	28,9
130	13,1	23,4	17,2	28,4	19,5	31,1
140	12,1	25,3	18,2	29,4	18,5	30,1
150	13,8	22,7	18,1	28,4	18,0	27,2
160	13,3	24,1	17,9	27,3	18,8	28,1
170	13,5	23,1	18,4	25,8	18,6	26,7
Promedios	13,0	27,2	18,2	30,4	19,6	30,2
Desv. Stand	1,33	4,01	0,56	3,73	1,27	3,67
CV %	10,3	14,7	3,1	12,3	6,5	12,2

Tabla 9. Láminas almacenadas con el riego de dos caudales T2.

Profundidad	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	00-60 cm
Distancia	Lámina almacenada			
(m)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
0	36,1	27,8	31,8	95,7
10	36,1	29,2	27,4	92,7
20	38,5	24,4	28,6	91,5
30	37,6	30,4	23,8	91,8
40	30,9	33,5	15,1	79,5
50	31,1	30,8	16,3	78,1
60	35,9	24,3	12,4	72,6
70	27,5	25,7	18,8	71,9
80	28,0	22,5	24,7	75,2
90	20,8	31,1	20,5	72,3
100	33,4	20,5	23,7	77,6
110	23,1	18,2	18,9	60,3
120	29,3	21,0	18,3	68,7
130	20,7	22,4	23,1	66,2
140	26,4	22,4	23,2	71,9
150	17,9	20,6	18,4	56,9
160	21,7	18,8	18,6	59,1
170	19,3	14,8	16,2	50,3
Promedio	28,6	24,3	21,1	74,0
Desv. Stand	7,0	5,2	5,0	18,0
CV (%)	24,7	21,5	23,6	24,3

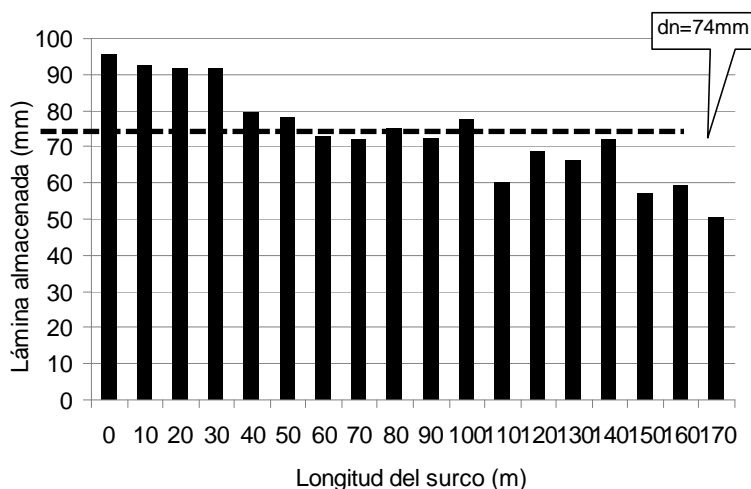


Figura 5. Láminas almacenadas a lo largo del surco regado con dos caudales T2.

Tabla 10. Eficiencias de riego logradas aplicando dos caudales T2.

Aplicación	Aplicación 1/4 inferior	Almacenaje	Distribución	Coefic. de uniformidad
Efa (%)	Efci (%)	Efalm (%)	Efd (%)	CU (%)
71,6	54,8	100,0	86,5	76,5

En la Tabla 13 se aprecian las humedades volumétricas medidas antes y después del riego por pulsos y en la Tabla 14 y la Figura 7 constan las láminas almacenadas.

Las eficiencias logradas por el riego con caudal discontinuo se muestran en la Tabla 15, que resultaron, según Roscher (1985), "satisfactoria" para la eficiencia de aplicación y "buenas" para las eficiencias de almacenaje y de distribución.

En la Tabla 16 se presentan los valores de las distintas eficiencias de riego alcanzadas por los diferentes tratamientos. La Figura 8 permite visualizar que el riego por pulsos logró superar a los riegos con caudal único y con dos caudales en todos los valores de eficiencias y de uniformidad, salvo en la eficiencia de almacenaje, donde no se observan diferencias.

Comparando las eficiencias de riego entre tratamientos, en la Tabla 17 se muestran los incrementos logrados, de los cuales los más significativos ocurren con las Efa y Efaci y el CU, mientras que la Efa_m se mantiene igual para los 3 tratamientos. Las Efaci y Efd se correlacionan fuertemente, evidenciando la severidad de la Efaci, que considera en su cómputo solamente el 25% de los menores valores de láminas almacenadas para representar la lámina media almacenada en la zona de raíces (sesgando su valoración, muy vinculada con la uniformidad). Efectivamente las correlaciones entre la Efaci y los indicadores de uniformidad son elevadas, con $r^2 = 0,99$ para Efaci - Efd y $r^2 = 0,96$ para Efaci - CU, disminuyendo levemente las correlaciones Efa - Efaci, con $r^2 = 0,92$ y Efa - Efd con $r^2 = 0,87$.

Tabla 11. Datos de avance en el riego por pulsos T3.

Distancia (m)	Surco 1 Tiempo (min)	Surco 2 Tiempo (min)	Surco 3 Tiempo (min)	Promedio Tiempo (min)
25	7	4	6	6
50	25	14	17	19
75	49	31	31	37
100	74	60	53	62
125	104	89	80	91
150	131	115	116	121
175	164	136	144	148

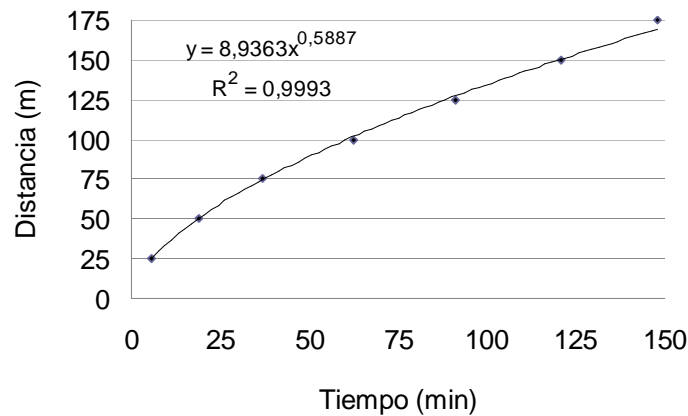


Figura 6. Curva de avance del riego por pulsos T3.

Tabla 12. Volúmenes aplicados y lámina total derivada en el riego por pulsos T3.

Pulsos	Tiempo (min)	QMNE (m ³ .s ⁻¹)	Vol. aplic. (m ³)	Area (m ²)	Lámina aplicada	
					(m)	(mm)
Avance 1	18	0,0013	1,404	119	0,0118	11,8
Avance 2	24	0,0013	1,872	119	0,0157	15,7
Avance 3	33	0,0013	2,574	119	0,0216	21,6
Remojo 1	11	0,0013	0,858	119	0,0072	7,2
Remojo 2	11	0,0013	0,858	119	0,0072	7,2
Remojo 3	11	0,0013	0,858	119	0,0072	7,2
Totales	108		8,424	119	0,0708	70,8

Tabla 13. Humedades volumétricas registradas antes y después del riego por pulsos T3.

Distancia m	Profundidad 0,1 m		Profundidad 0,3 m		Profundidad 0,5 m	
	W antes	W después	W antes	W después	W antes	W después
	%	%	%	%	%	%
0	11,7	24,2	17,2	24,9	20,1	27,4
10	11,8	22,8	18,9	27,3	22,3	28,7
20	14,8	24,0	21,9	32,8	25,2	33,1
30	12,9	23,8	22,1	32,3	26,7	32,4
40	12,3	21,7	20,1	30,1	24,1	32,4
50	13,1	21,7	19,6	31,3	25,5	31,7
60	11,3	22,6	19,0	27,5	23,0	28,3
70	13,2	23,3	17,9	26,4	23,3	29,8
80	12,2	20,5	16,4	28,9	21,1	29,2
90	13,1	22,2	19,1	27,7	22,2	30,5
100	12,9	20,0	18,0	28,2	20,7	31,3
110	12,7	21,6	18,2	29,6	22,6	30,2
120	13,0	20,4	18,7	31,2	22,9	28,7
130	12,8	21,0	17,0	29,5	22,7	31,2
140	13,1	24,5	19,2	26,9	21,5	28,7
150	12,5	25,5	18,2	26,7	19,9	25,8
Promedio	12,7	22,5	18,8	28,8	22,7	30,0
Desv. Stand	1,1	2,2	1,7	3,8	2,5	3,9
CV (%)	8,7	9,9	8,9	13,2	10,9	13,0

Tabla 14. Láminas almacenadas con el riego por pulsos T3.

Profundidad Distancia (m)	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	00-60 cm
	Lámina almacenada (mm)			
0	24,9	15,4	14,5	54,8
10	21,8	16,9	12,8	51,5
20	18,6	21,7	15,8	56,0
30	21,8	20,4	11,3	53,5
40	18,9	20,0	16,6	55,4
50	17,1	23,2	12,3	52,7
60	22,7	17,0	10,6	50,3
70	20,2	17,1	13,1	50,3
80	16,6	25,0	16,2	57,8
90	18,2	17,2	16,6	52,0
100	14,3	20,4	21,2	55,9
110	17,7	22,8	15,2	55,7
120	14,9	25,0	11,5	51,4
130	16,4	25,0	17,0	58,4
140	22,8	15,4	14,4	52,5
150	26,0	17,0	11,8	54,8
Promedio	19,5	20,0	14,4	53,9
Desv. Stand	3,5	3,5	2,7	9,5
CV (%)	17,8	17,7	18,8	17,7

La Efa del riego con dos caudales supera un 44,8% a la del riego con caudal único y la Efa del riego por pulsos incrementa un 53,9% a la alcanzada por el caudal único. La Efa del riego por pulsos sólo supera un 6,3% a la del riego con dos caudales. Los mayores incrementos ocurren con la Efaci, donde la eficiencia del riego con caudal discontinuo es un 123,7% mayor que la correspondiente al caudal único y un 31,3% mayor a la del riego con dos caudales. Para comparar la uniformidad de aplicación de la lámina de riego entre los tratamientos, se promediaron los valores de Efd y CU, cuya correlación es muy alta ($r^2=0,98$), resultando entonces un incremento de la uniformidad del 34,2% del riego por pulsos respecto del riego con un solo caudal y del 16,8% respecto del riego con dos caudales.

Los valores de los indicadores de performance consignados en este trabajo coinciden entre otros, con los reportados por Schilardi (2011), Morábito et al. (2012) y Romay (2010; 2012) referidos a mediciones realizadas en Mendoza, por Roqué (2003) en Córdoba y por Génova (1994 b) en Buenos Aires.

CONCLUSIONES

La revisión bibliográfica referida a la evolución de los criterios de evaluación de la performance del riego

indica la vigencia de los indicadores utilizados en este trabajo, pues se actuó en zona húmeda donde el riego es de carácter complementario y las lluvias controlan la salinidad edáfica (Génova 2003; 2006; 2007; 2010; 2011). Sin embargo, debería tenerse en cuenta la incorporación de nuevos criterios sobre usos beneficiosos y no beneficiosos, en zonas áridas y semiáridas bajo riego integral, donde por ejemplo debe cumplirse el requerimiento de lixiviación para mantener el balance salino del suelo (tradicionalmente dicha fracción de agua se considera una pérdida aunque no lo es desde el punto de vista de la sustentabilidad de los agroecosistemas).

El riego por pulsos T3 superó a los otros métodos de riego en las eficiencias de aplicación, de aplicación del cuarto inferior y de distribución. Las eficiencias de almacenaje fueron prácticamente iguales en los tres métodos de riego.

Las eficiencias de aplicación fueron para T3 del 74,8%, para T2 del 71,6% y para T1 del 49,4%. Las eficiencias del cuarto inferior fueron del 70,6% para T3, del 54,8% para T2 y del 32,1% para T1. La uniformidad se evaluó promediando la eficiencia de distribución con el coeficiente de uniformidad, resultando para T3 un 95,2 %, para T2 un 81,5% y para T1 un 70,9%.

El mayor incremento de los indicadores logrado por el riego por pulsos correspondió a la eficiencia de aplicación del cuarto inferior (criterio evaluatorio más severo), superando en un 123,7 % al uso de un solo caudal y un 31,3 % al manejo con dos caudales. En

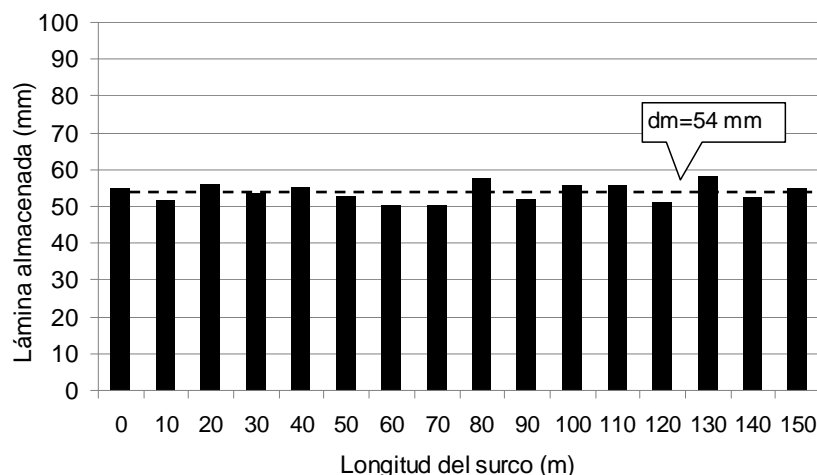


Figura 7. Láminas almacenadas a lo largo del surco regado con caudal discontinuo T3.

Tabla 15. Eficiencias logradas con el riego por pulsos T3.

Aplicación	Aplicación 1/4 inferior	Almacenaje	Distribución	Coeffic. de uniformidad
Efa (%)	Efci (%)	Efalm (%)	Efd (%)	CU (%)
76,1	71,9	100,0	96,0	94,4

Tabla 16. Eficiencias de riego alcanzadas utilizando caudal único, dos caudales y caudal discontinuo.

Eficiencias	Símbolo	Caudal único %	Dos caudales %	Caudal discontinuo %
de aplicación	Efa	49,4	71,6	76,1
de aplicación del cuarto inferior	Efci	32,1	54,8	71,9
de almacenaje	Efalm	100,0	100,0	100,0
de distribución	Efd	76,9	86,5	96,0
Coefficiente de uniformidad	CU	65,0	76,5	94,4

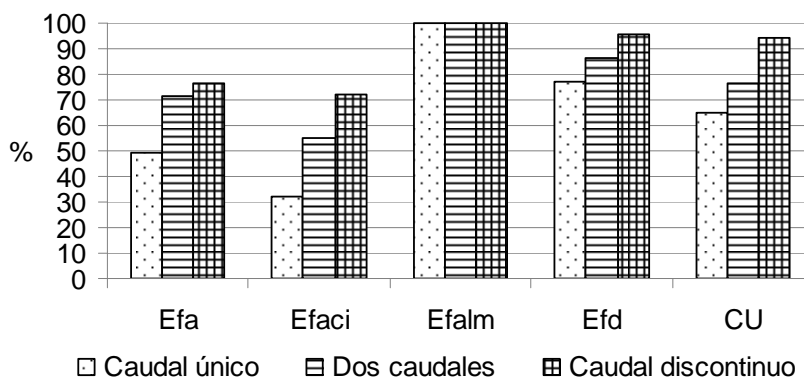


Figura 8. Eficiencias logradas por los métodos de riego. T1: caudal único, T2: dos caudales y T3: caudal discontinuo (riego por pulsos).

Tabla 17. Porcentaje de incrementos de las eficiencias de riego de los tratamientos.

Eficiencias	T2 vs T1 (%)	T3 vs T1 (%)	T3 vs T2 (%)
Efa	44,8	53,9	6,3
Efaci	70,4	123,7	31,3
Efalm	0,0	0,0	0,0
Efd	12,5	24,9	11,0
CU	17,7	45,3	23,4

cuanto a la uniformidad de riego, el T3 superó en un 34,2 % a T1 y en un 16,8% a T2.

Considerando los resultados del trabajo se destaca, para la región húmeda pampeana, la opción de regar el cultivo de maíz en forma complementaria y gravitacional por surcos, cuando los lotes agrícolas no requieran un acondicionamiento del relieve que implique costos de importancia, haciéndolo competitivo frente a los costos de equipamiento y operativos requeridos por la aspersión y el goteo. La incorporación de tecnología para el diseño de métodos que utilizan caudal continuo, mejora las eficiencias de aplicación y distribución y la instalación de un equipamiento de riego con caudal discontinuo adecuadamente diseñado, asegura alcanzar las máximas eficiencias y uniformidades de riego.

Agradecimientos

A la UNLP por el apoyo económico al Proy. A 215, a la empresa P&R Argentina, que proveyó la válvula, mangas y compuertas para el riego discontinuo, a la empresa Monsanto SA (Planta Pergamino) que donó insumos (semilla y herbicida) y a la E.E.J. Hirschhorn por el apoyo a las tareas de campo.

BIBLIOGRAFIA

ASCE Standards. 1978. Describing irrigation efficiency and uniformity. J. Irrigation and Drainage Engineering, ASCE, 104(1):35-41.

Bos, M. & J. Nugteren. 1990. On irrigation efficiencies. Publication 19 ILRI. The Netherlands.

Bos, M. & J. Chamboleyron. 1998. Parámetros de desempeño de la agricultura de riego en Mendoza, Argentina. Instituto Internacional del Manejo del Agua, Serie Latinoamericana: N° 5. 111 pp.

Bos, M., M. Burton & D. Molden. 2005. Irrigation and drainage performance assessment, practical guidelines. International Water Management Institute. 158 pp.

Burt, C., A. Clemmens, T. Strelkoff, K. Solomon, R. Bliesner, L. Hardy, T. Howell & D. Eisenhauer. 1997. Irrigation performance measures: Efficiency and uniformity. Journal of Irrigation and Drainage Engineering. 123(6):423-442.

Chamboleyron, J. 1977. Evaluación de la eficiencia de uso del agua de riego a nivel zonal. INCyTH-CRA, Mendoza. Argentina. 18 pp.

Christiansen, J. 1942. Irrigation by sprinkling. University of California. Agr. Exp. Sta. Bull. 610, 120 p.

Cridle, W., S. Davis, C. Pair & D. Shockey. 1956. Methods for evaluating irrigation systems. U.S. Department of Agriculture Handbook 82, 24 pp. Washington.

Dalton, P. & S. Raine. 1999. Measures of irrigation performance and water use efficiency. In Research, development and extension in Irrigation and Water Use Efficiency: A review for the Rural Water Use Efficiency Initiative. Chapter 1. National Centre for Engineering in Agriculture Publication 179743/2, USQ, Toowoomba.

FAO. 2010. Programa Cropwat v. 8.0. Disponible en www.fao.org/water/cropwat

Feyen, J. & D. Zerihum. 1999. Assessment of the performance of border and furrow irrigation systems and the relationship between performance indicators and system variables. Agricultural Water Management. 40: 353-362.

Fok, Y. & A. Bishop. 1965. Analysis of water advance in surface irrigation. J. Irrigation and Drainage Eng., ASCE, Vol.91 (IR1): 99-117.

Génova, L. 1994 a. Riego complementario del cultivo de maíz: análisis comparativo de costos totales de riego de cinco tipos de equipamiento. Actas del Primer Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola. Universidad de Concepción, Chile.

Génova, L. 1994 b. Diseño, operación y evaluación de riego complementario por surcos, en terrenos no nivelados de la región norpampeana. Actas del Congreso Internacional de Ingeniería Rural y III Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Morón, Pcia. de Buenos Aires.

Génova, L. 1995. Diseño y operación de riego complementario por surcos de maíz, soja, sorgo y girasol en la Región Pampeana Húmeda. Segundo Seminario de Actualización Técnica en Riego. Ed. Cons. Prof. de Ingeniería Agronómica-Centro Arg. de Ingenieros Agrónomos-INTA- Sociedad Rural Argentina. pp 25-38. Buenos Aires.

Génova, L. 2003. Resistencia y resiliencia de suelos pampeanos a la degradación salina y sódica, disturbados por riego complementario. Revista Facultad de Agronomía. 23 (2-3) 119:130.

- Génova, L.** 2006. Sustentabilidad de agroecosistemas bajo riego complementario en la Pampa Húmeda Argentina. Rev. Brasileira de Agroecología.1:71-74.
- Génova, L.** 2007. Resiliencia a la degradación salina y sódica de algunos suelos pampeanos, regados complementariamente con aguas subterráneas bicarbonatadas sódicas. Tesis doctoral. Fac. de Cs. Agrarias y Forestales, Univ. Nac. de La Plata 195 pp.
- Génova, I.** 2010. Sustentabilidad de agroecosistemas pampeanos argentinos regados complementariamente. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en zonas de llanura. Tomo II. Capítulo Agrohidrología. Editores M. Varni, I. Entraigas y L. Vives. Azul, Pcia. de Bs. Aires, Argentina 605-612 pp.
- Génova, L.** 2011. Calidad del agua subterránea para riego complementario en la Pampa Húmeda argentina. Revista de la Facultad de Agronomía Vol 110 (2): 63-81.
- Grassi, C.** 1998. Fundamentos del Riego. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida, Venezuela.
- Grassi, C.** 2000. Diseño y operación de riego por superficie. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT). Mérida, Venezuela. 391 pp.
- Hammad, S. & G. Stringham.** 1978. Maximum No erosive furrow irrigation Stream Size. Journal of Irrigation and Drainage Division ASCE V. 104 (275-281).
- Israelsen, O. & V. Hansen.** 1965. Principios y aplicaciones del riego. Universidad del Estado de Utah, Logan, Utah, Estados Unidos. 385 pp.
- Jensen, M.** 2007. Beyond irrigation efficiency. Irrig Sci (2007) 25:233-245.
- Keller, A. & J. Keller.** 1995. Effective efficiency: a water use efficiency concept for allocating freshwater resources. Discussion paper 22, Center for Economic Policy Studies, Winrock International, 19 pp.
- Kostiakov, A.** 1932. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. VI Congreso Internacional de la Ciencia del Suelo, Paris, Francia.
- Lankford, B.** 2012. Fictions, fractions, factorials and fractures; on the framing of irrigation efficiency. Agricultural Water Management 108:27-38.
- Losada Villasante, A. & S. Roldán Caña.** 2009. Riego por Superficie. Apuntes del curso de posgrado de Maestría en Riego y Drenaje. Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ciencias Agrarias. Mendoza . 143 pp.
- Merriam, J. & J. Keller.**1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Department of Agricultural and irrigation engineering. Utah State Univ. Logan.
- Merriam, J., J. Keller & J. Alfaro.** 1973. Irrigation system evaluation and improvement. Department of agriculture and Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Morábito, J.** 2003. Desempeño del riego por superficie en el área de riego del río Mendoza. Eficiencia actual y Potencial. Universidad Nacional de Cuyo – Facultad de Ciencias Agrarias. Tesis de Maestría. 92 pp. Mendoza.
- Morabito, J; C. Mirábile & S. Salatino.** 2007. Eficiencia de riego superficial, actual y potencial en el área de regadío del río Mendoza (Argentina). Revista Ingeniería del Agua de la Universidad de Córdoba, España. 14 (3): 199-213.
- Morábito, J., S. Salatino & C. Schilardi.** 2012. El desempeño del uso agrícola del agua en los oasis de los ríos Mendoza y Tunuyán a través de nuevos indicadores. VI Jornadas de riego y fertirriego. Fac. de Ciencias agrarias, Univ. Nac. de Cuyo, Mendoza, Argentina.
w.w.w. riegoyfertirriego.com/VI_Jornadas/index.htm
- Pereira, L., I. Corder & I. Iacovides.** 2012. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. Agricultural Water Management. 108 (2012) 39–51.
- P&R Argentina.** 2013. Disponible en: <http://www.pyrargentina.com.ar>
- PROSAP. Programa de servicios agrarios provinciales.** 2006. Servir al agro. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos, Ministerio de Economía y Producción de la R. Argentina. Bs. Aires. 180 pp.
- Richards, L. (ed).** 1954. Manual de diagnóstico y recuperación de suelos salinos y sódicos. Manual de Agricultura N° 60. USA. Washinton.
- Romay, C. & J. Morábito.** 2000. Comparación entre riego tradicional y pulsos. Análisis de casos en Mendoza, Argentina. XVIII Congreso Nacional del Agua, Santiago del Estero.
- Romay, C.** 2010. Riego por pulsos: manejo y diseño. V Jornadas de Riego y Fertirriego. Chacras de Coria, Mendoza.
- Romay, C. & L. Génova.** 2011. Recomendaciones para eficientizar el riego con caudal discontinuo, ajustando variables de programación de la válvula P&R. Segundas Jornadas Nacionales de Riego Discontinuo.
- Romay, C., L. Génova, H. Salgado & S.M. Zabala.** 2012. Recomendaciones para mejorar la eficiencia en el riego discontinuo programando la válvula automática. VI Jornadas de Riego y Fertirriego. En www.riegoyfertirriego.com. Fac. de Cs. Agrarias, UNCuyo. Chacras de Coria.
- Roqué, C.** 2003- Siembra directa y riego discontinuo en el departamento de Cruz del Eje, Córdoba, Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Alimentos Córdoba, Argentina
- Roscher, K.** 1985. Surface Irrigation. Characteristics, design and performance. Department of Irrigation and Civil Engineering. Agricultural University, Wageningen. The Netherlands.
- Salatino, S., R. Bagini, G. Satlari & J. Morábito.** 1992. Parámetros y eficiencia de riego en el área de influencia del Arroyo Claro en Tunuyán, Mendoza. Inst. Nac. del Agua, Depto. Gral. de Irrigación e Inst. Nac. de Tecnología Agropecuaria. Mendoza.
- Salgado H., J. Etchegoin, J. Mainero, F. Latorre & D. García.** 2012. Levantamiento topográfico de Lote 12c de la Estación Experimental Julio Hirschhorn. En: "Estación Experimental Ing. Agr. Julio Hirschhorn. Docencia, investigación y extensión 2010-2012". Fac. de Cs. Agrarias y Forestales, UNLP, La Plata, 40-41.
- Schilardi, C., J. Morábito & R. Vallone.** 2010. Parámetros físicos del riego por superficie en el área de regadío de la Cuenca del Río Tunuyán Superior, Mendoza, Argentina. XXI Congreso Nacional del Agua. Trelew, Chubut.

Schilardi, C. 2011. Desempeño del riego por superficie en el área de regadío de la Cuenca del Río Tunuyán Superior, Mendoza, Argentina. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza.

Turner, G. (ed). 1987. The Australian Concise Oxford Dictionary of Current English. 7th Edn. Oxford University Press, Melbourne.

USDA, 1984. SCS National Engineering Handbook. Section 15, Chapter 5. Furrow Irrigation. US Government Printing Office, Washington, D.C.

USDA. 2009. WinSRFR 3.1 Program User Manual U.S Department of Agriculture, Agricultural Research Service. Arid Land Agricultural Research Center. 193pp.

Vallone, R., D. Prieto & J. Morabito. 2007. Desarrollo de tecnologías para el saneamiento y recuperación de tierras y optimización de sistemas de riego en áreas de regadío. Jornadas de Investigación en Recursos Hídricos, Mendoza

Walker, R. 1989. Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems. FAO. Irrigation and Drainage Paper N° 45. 85 p.

Walker, R. 1993. SIRMOD: Surface Irrigation Simulation Software. Biological and Irrigation Engineering Department. Utah State University, Logan, Utah, USA

Walker, R. 2003. Simulación, diseño y evaluación de riego por superficie. Guía del curso y documentación técnica. Utah State University. Logan, Utah, USA. 63 pp.

Walker, R. & G. Skogerboe. 1987. Surface Irrigation Theory and Practice. Utah State University, Prentice – Hall. Logan.

Wolters, W. 1992. Influences on the efficiency of irrigation water use. Publication 51. ILRI. The Netherlands.

Zappi, A. 2012. El riego en Argentina. Rev. Hydria N° 40 Proxar,. 6-11 pp.