

Evaluación del riego por melgas en los suelos del sur del Uruguay. Uso del modelo WinSRFR, resultados preliminares

Puppo Lucía¹, Aguerre Martín¹, Camio Gerardo¹, Hayashi Raquel¹, Morales Pablo¹

¹Universidad de la República, Facultad de Agronomía, Departamento de Suelos y Aguas. Garzón 780, 12900 Montevideo, Uruguay. Correo electrónico: lpuppo@fagro.edu.uy

Recibido: 08/08/2017 - Aceptado: 19/04/2018

Resumen

El riego por melgas es la modalidad de riego por superficie que se adapta mejor a los cultivos forrajeros en siembra directa, pero las condiciones de alta pendiente y baja velocidad de infiltración de la mayoría de los suelos del sur de Uruguay hacen difícil su adaptación cuando se pretende aplicar las recomendaciones de la bibliografía internacional. El objetivo del estudio fue determinar indicadores de desempeño del riego por melgas para los suelos del sur del Uruguay y plantear escenarios de optimización para identificar estrategias de manejo. Se instaló un ensayo de riego por melgas orientadas en el sentido de la máxima pendiente, variando la dirección entre grupo de melgas para minimizar la pendiente transversal. La buena conformación de los bordos de las melgas favoreció las medidas de los indicadores de desempeño. Para poder evaluar situaciones diferentes a las ensayadas a campo se planteó el uso del modelo WinSRFR. Los caudales con mejor desempeño fueron más bajos que los recomendados por la bibliografía internacional. Para el suelo evaluado y largo de ladera de 50-60 m el caudal 0,2 L/s/m tuvo la mejor respuesta a la optimización por tiempo de corte. El caudal 0,5 L/s/m alcanzó las mejores eficiencias con largos en el entorno de 170 m. El caudal 0,33 L/s/m podría ser la mejor solución en zonas donde la ladera tiene longitud variable, permitiendo alcanzar alta eficiencia de aplicación mediante la modificación del tiempo de riego. El modelo predijo muy bien el volumen infiltrado y escurrido.

Palabras clave: eficiencia de aplicación, uniformidad de distribución, riego por superficie

Evaluation of Border Irrigation in the Southern Uruguayan Soils. Use of the WinSRFR Model: Preliminary Results

Summary

Border irrigation is the modality of surface irrigation that fits better to the fodder crops in direct seeding, however, the high slopes and low infiltration rates of most of the soils of the south of Uruguay make it difficult to adapt to the recommendations of the international bibliography. The objective of the study was to determine the border irrigation's performance indicators in the southern Uruguayan soils, and to identify optimization scenarios to define management strategies. An experiment was installed with border irrigation oriented in the direction of maximum slope, varying the direction between the border groups with the aim of minimizing the transversal slope. The good conformation of the borders favored the field measures of the performance indicators. In order to evaluate situations different from those tested in the field, the use of the WinSRFR model was proposed. For the soil evaluated, a long of slope of 50-60 m the flow 0.2 L/s/m had the best response to the optimization by cutting time. The flow rate 0.5 L/s/m achieved the best efficiencies with lengths around 170 m. The flow rate of 0.33 L/s/m could be the best solution in areas where the slope has variable length, allowing to reach a high application efficiency by modifying the irrigation time. The model predicted the infiltrated and drained volume very well.

Keywords: application efficiency, distribution uniformity, surface irrigation

Introducción

Los altos costos de inversión y operativos de los sistemas de riego presurizados hacen que la inclusión del riego no resulte siempre en una clara rentabilidad en sistemas de producción agrícola ganaderos o agrícola lecheros de menor escala comercial. En este sentido el riego por superficie tiene como principal ventaja los menores costos de inversión y operativos, determinando que sea el método más extendido en el mundo (Pereira et al., 2010).

La Unidad de Hidrología de la Facultad de Agronomía generó tecnología de riego por surcos adaptada a los cultivos de producción intensiva para los suelos de Uruguay (Durán y García Petillo, 2007; García Petillo, 2011). La modalidad de riego por superficie que se adapta mejor a los cultivos forrajeros en siembra directa es el riego por melgas, sin embargo las condiciones de alta pendiente y baja velocidad de infiltración de la mayoría de los suelos de Uruguay hacen difícil su adaptación cuando se pretende aplicar las recomendaciones de la bibliografía internacional (García Petillo et al., 2012).

El primer trabajo de investigación de la Unidad de Hidrología en esta modalidad de riego por superficie no logró valores aceptables de uniformidad de distribución (UD) ni de eficiencia de aplicación (EA) debido a la presencia de pendiente transversal en las melgas (García Petillo et al., 2012). En respuesta a lo anterior, en el 2016 con el Proyecto FSA 12590, se puso énfasis en la sistematización del ensayo de riego por melgas definiendo la dirección de las mismas en el sentido de la máxima pendiente pero minimizando la pendiente transversal, sin necesidad de recurrir a la nivelación total del terreno. En este trabajo se consiguió además una buena conformación de los bordos de las melgas, lo cual evitó la canalización del agua en el sentido de la máxima pendiente y permitió las medidas a campo de la EA y UD en condiciones controladas minuciosamente.

Para poder evaluar situaciones diferentes a las ensayadas a campo se utilizaron modelos de simulación. Sin embargo se debe poner especial cuidado a las mediciones de los datos de entrada para poder juzgar el desempeño del modelo como indican Martínez et al. (2016) quienes además recomiendan una posterior validación con experimentos a campo.

El WinSRFR (Bautista et al., 2009a, 2009b; Bautista, Schlegel y Strelkoff, 2012; Strelkoff, 1990) es el último de una serie de modelos de simulación hidráulica del riego por superficie desarrollados por el USDA-Agricultural Research Service, que es de uso sencillo y es un software libre.

Dentro de este software, el módulo Análisis de Eventos se usa para reproducir eventos de campo con diferentes caudales, por ejemplo, y se pueden optimizar los tiempos de corte utilizando el módulo Análisis Operacional para los distintos caudales. Mediante el módulo Simulación se puede modificar el largo de las melgas y analizar el impacto de esta variable sobre los indicadores de desempeño del riego.

El objetivo del estudio fue determinar indicadores de desempeño del riego por melgas para las condiciones de los suelos del sur del Uruguay y plantear escenarios de optimización para identificar estrategias de manejo. Este trabajo permitió evaluar en forma preliminar el desempeño del modelo WinSRFR en las condiciones edáficas y topográficas de los suelos del sur del país e identificar estrategias de manejo para optimizar el riego. Con la finalidad de validar el modelo se planea realizar ensayos de campo con los parámetros optimizados por el modelo.

Materiales y métodos

Sistematización del sitio del ensayo

En febrero de 2016 se realizó el relevamiento topográfico de un área de 5000 m² con curvas de nivel a 0,2 m de intervalo vertical, en el Centro Regional Sur de la Facultad de Agronomía Progreso, Canelones (34°36'26.38" S 56°13'03.36" W).

A partir del plano topográfico se realizó una sistematización para riego por melgas orientando las mismas en el sentido de la máxima pendiente, minimizando la pendiente transversal (Figura 1).

Los bordos se construyeron con una pala niveladora, con la que además se eliminó el microrelieve del área de la melga (Figura 2)

En la Figura 2 se observa la maquinaria de laboreo, eliminando el microrelieve y construyendo los bordos. Cada melga quedó constituida mediante dos pasadas de pala que desplazaron la tierra hacia los lados opuestos conformando los bordos que limitan la melga.

Se trazaron nueve melgas de riego con pendiente longitudinal de entre 2,5 y 3 %, 6 m de ancho y 50-60 m de longitud (Figura 1). El ancho de melga se fijó en 6 m por ser el ancho más conveniente para la conformación de los bordos, y porque este ancho no interfiere con las otras labores realizadas a nivel comercial: siembra, fumigaciones y cosecha.

En abril de 2016 se sembró una mezcla de festuca, trébol blanco y lotus. El agua de riego se derivó desde el

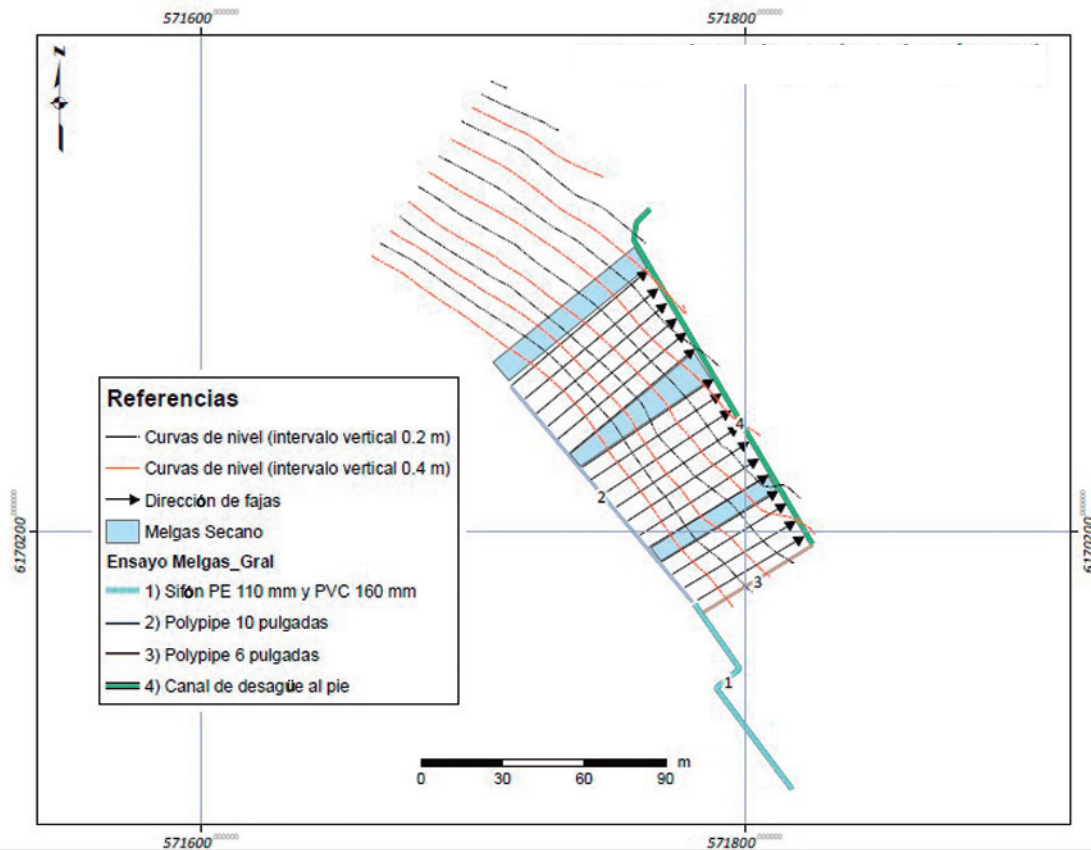


Figura 1. Croquis del ensayo con curvas de nivel y referencias generales.



Figura 2. Pala de cola utilizada para construir los bordos de las melgas.

tajamar mediante dos sifones, polietileno (PE) y diámetro nominal (DN) de 110 mm. Ambos convergían en un aforador de placa de orificio que permitió medir y ajustar el caudal mediante llave de regulación. La conducción desde el aforador hasta las melgas se realizó con mangas de polietileno

colapsable de 10" y 250 micrones (Figura 1). Una chimenea de 1 m permitió regular la presión máxima tolerada por la manga. La aducción del agua a cada melga se realizó mediante dos compuertas regulables de 2", distanciadas a 3 m entre sí.

Cuadro 1. Parámetros físicos e hídricos del suelo.

Perfil	Profundidad cm	Textura	CC % ps	PMP % ps	Dap g cm ⁻³	AD mm 10 cm ⁻¹	mm horiz ⁻¹
A	0-20	Franco Arcilloso	23,7	12,6	1,25	14,0	28
Bt	20-40	Arcilloso	26,8	14,9	1,43	17,1	34
BC	40-60	Arcilloso	23,7	12,6	1,43	16,0	32
Total							94

CC % ps = capacidad de campo en base peso seco; PMP % ps = punto de marchitez permanente en base peso seco; Dap = densidad aparente; AD = agua disponible

Determinación de los parámetros hídricos y físicos del suelo del ensayo

La capacidad de campo (CC) por horizonte se determinó utilizando la metodología descrita en García Petillo et al. (2012) y punto de marchitez permanente (PMP) fue estimado mediante la regresión de Silva et al. (1988). Se midió densidad aparente por horizonte, a partir de muestras imperturbadas.

El suelo del ensayo fue un Brunosol éutrico típico LAc., Unidad Tala Rodríguez, correspondiente a Argiudol típico según la clasificación taxonómica del USDA (United States Department of Agriculture). La descripción del perfil se detalla en el Cuadro 1.

La infiltración acumulada se midió con doble anillo infiltrómetro y se ajustó a una curva potencial, del tipo:

$$I_{cum} = A * t^B \quad (1)$$

siendo I_{cum} = la infiltración acumulada en función del tiempo en mm; A y B el coeficiente y exponente de la ecuación potencial respectivamente y t el tiempo de entrada del agua al suelo en minutos. Esta determinación se hizo cuando el suelo estuvo en la condición de humedad correspondiente al momento previo al riego, con 50 % de agotamiento de agua disponible (AD).

Luego y en base a los datos aportados por la evaluación del riego se corrigió el coeficiente A de la ecuación (1) por balance de volúmenes (A_{modif}). Esta es la metodología que usa el modelo WinSRFR cuando se elige la opción Merriam y Keller en el módulo Análisis de Eventos (Bautista et al., 2009a; Bautista, Schlegel y Strelkoff, 2012).

De acuerdo a la siguiente relación:

$$A = A_{modif} * L_{inf} / I_{cum} \quad (2)$$

siendo A_{modif} = coeficiente de la ecuación de infiltración modificado; A = coeficiente de la ecuación de infiltración con doble anillo infiltrómetro; L_{inf} = lámina infiltrada promedio

calculada por balance de volúmenes; I_{cum} = lámina infiltrada promedio calculada con la ecuación con doble anillo infiltrómetro. La velocidad de infiltración, en mm/min, se obtuvo derivando la infiltración acumulada en función del tiempo. La infiltración básica del suelo, i_b , se determinó mediante la siguiente fórmula (Pascual, 1990; Morábito et al., 2008):

$$i_b = (-600 * b)^b * a * 60 \quad (3)$$

siendo i_b = la infiltración básica del suelo en mm/h; a = el coeficiente de la ecuación de velocidad de infiltración y b = el exponente de la ecuación de velocidad de infiltración.

Tratamientos aplicados y programación del riego

Se realizaron riegos de prueba para definir los caudales a evaluar, seleccionándose aquellos caudales más bajos que llegaron al pie de las melgas, hasta el recomendado por el ábaco de Criddle (Pascual, 1990), que para las condiciones del ensayo fue 0,5 L/s/m. Los caudales unitarios evaluados en cada riego fueron: Q1 = 0,2; Q2 = 0,33 y Q3 = 0,5 L/s/m, con tres repeticiones cada uno. Los caudales de entrada para los 6 m de ancho de melga fueron: 1,2; 2,0 y 3,0 L/s, para Q1, Q2 y Q3 respectivamente. Los caudales se rotaron entre las distintas melgas para minimizar el efecto de la pendiente transversal a lo largo de la ladera del ensayo.

Los tiempos de riego se definieron a partir del volumen requerido para aplicar la lámina bruta (Hart et al., 1980). Se utilizó un volumen fijo y similar en los tres caudales para calcular el tiempo de corte o tiempo de riego, según la siguiente ecuación:

$$Tr = LN * L * A / (Qr * EAe * 3600) \quad (4)$$

siendo el Tr = tiempo de corte en horas; LN = Lámina neta (mm); L = largo de la melga en m; A = ancho de la melga en m; Qr = caudal de riego en L/s y EAe = eficiencia de aplicación estimada expresada como fracción.

Los momentos de riego se definieron mediante balance hídrico del suelo en la profundidad radicular, 40 cm; con la metodología de FAO (Allen et al., 1998). Se usaron los datos de ETo de la Estación Experimental INIA, Las Brujas, ubicada a 13,2 km en línea recta al lugar del ensayo. Los coeficientes de cultivo (Kc) usados fueron: 1,15 como Kc máximo y 0,7 como Kc mínimo inmediato al corte. Las lluvias se midieron con un pluviómetro instalado en el lugar del ensayo. Los riegos se realizaron cada vez que el déficit acumulado fue de 32 mm, aplicando la lámina neta teórica, LN_n , de la misma magnitud. Esta condición de humedad es la correspondiente a un 50 % de agotamiento de AD en los 40 cm de arraigamiento de la pastura.

Se construyeron los hidrogramas de entrada y de salida para los tres caudales evaluados. Se colocaron aforadores tipo WSC a la entrada de cada melga para medir el caudal de entrada y se construyó un canal al pie de las melgas donde se ubicaron aforadores WSC para medir el caudal de salida. Se usaron dos tamaños diferentes de aforadores dependiendo del rango de caudales a medir.

Para construir la curva de avance y de receso para cada caudal se colocaron estacas en las melgas evaluadas cada 10 m y se tomó el tiempo de llegada y retiro del agua a cada estaca.

Se midió la humedad del suelo previa al riego y a las 48 h después de haber realizado el mismo, con el método gravimétrico. Para la determinación de humedad se sacaron muestras de los dos horizontes más superficiales, correspondiente a los 40 cm de profundidad radicular y luego se secaron a estufa a 105 °C hasta peso constante.

A partir de la humedad anterior y posterior al riego se calculó la EA y la UD. La EA se calculó como lámina neta (LN) dividido lámina bruta (LB). La LN fue la lámina que quedó efectivamente en la profundidad radicular, medida en mm y se calculó según García Petillo et al. (2012):

$$LN = Xd - Xa \quad (5)$$

siendo Xa el contenido promedio de agua en mm de todos los puntos antes del riego y Xd el contenido promedio de agua en mm de todos los puntos después del riego. La LB corresponde a la lámina total aplicada en mm y se calculó según García Petillo et al. (2012):

$$LB = Qr * Tr / (L * A) \quad (6)$$

donde Qr es el caudal de riego en L/s; Tr el tiempo de corte en s; L el largo de la melga en metros y A el ancho de la melga en m. La UD se calculó como la lámina infiltrada en el cuarto de la melga menos regado dividido la lámina infiltrada promedio en toda la melga (Walker y Skogerboe, 1987).

La lámina infiltrada promedio se calculó a partir del balance de volúmenes:

$$Linf = (Vol_a - Vol_e) / (L * A) \quad (7)$$

siendo Linf = lámina infiltrada promedio en la melga, en mm; Vol_a = volumen total aplicado en L; Vol_e = volumen total escurrido en L; L = largo de la melga en m; A = ancho de la melga en m.

La lámina infiltrada depende del tiempo de oportunidad. Entonces la lámina infiltrada en el cuarto menos regado correspondió al cuarto de la melga que tuvo menor tiempo de oportunidad (T receso - T avance), o sea menor tiempo de permanencia del agua en la superficie del suelo. Para su cálculo se sustituyó el tiempo de oportunidad del cuarto menos regado en la ecuación infiltración acumulada (1) y se usó el coeficiente A modificado (A_{modif}).

Utilización del programa WinSRFR

Se realizaron las simulaciones con el Programa WinSRFR, a partir de la información obtenida en el módulo de Análisis de Eventos de este modelo para reproducir los riegos evaluados a campo.

Las entradas que necesita este módulo son: hidrogramas de entrada y salida, curvas de avance y de receso, dimensiones de la melga, pendiente longitudinal y coeficiente de rugosidad de Manning (n). El «n» utilizado fue 0,4, máximo valor de rugosidad que permite utilizar el modelo.

Se optimizaron los tiempos de corte para cada caudal con el módulo Análisis Operacional. Este módulo necesita los mismos datos de entrada que al módulo Análisis de Eventos y se le agrega la infiltración acumulada con el parámetro A modificado por balance de volúmenes.

Se determinó el máximo largo de melgas analizando EA y UD, verificando la condición de Lámina mínima = LN_n (32 mm). Para ello se identificó en el módulo Diseño Físico el rango de largos con la máxima EA. Luego se trabajó en el módulo simulación verificando EA y UD para asegurar la lámina mínima al pie. Para esto último se utilizaron aquellas simulaciones que obtuvieron el mejor ajuste, mayor R^2 , entre los datos medidos y parámetros estimados.

Resultados y discusión

A continuación se presenta la determinación de la infiltración acumulada para el suelo del ensayo.

Los parámetros A y B de la curva se presentan en la Figura 3.

Derivando la ecuación anterior en función del tiempo se determinaron los parámetros de la curva de velocidad de

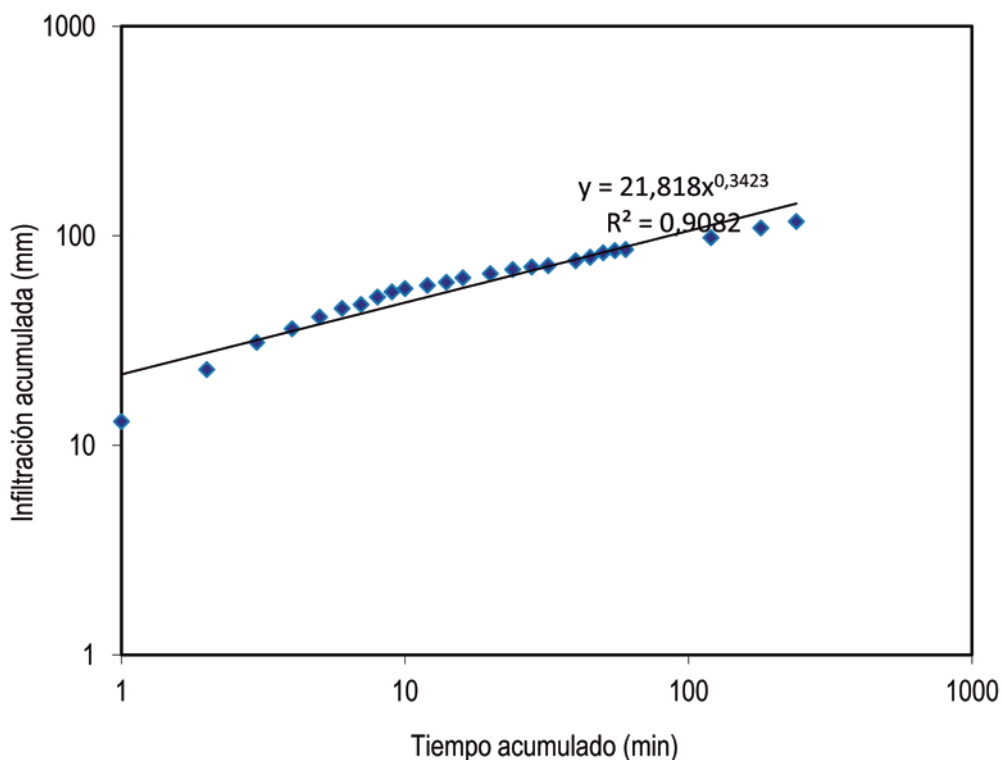


Figura 3. Infiltración acumulada del suelo del ensayo

infiltración, $a = 7,5$ y $b = -0,66$ y a partir de estos valores se determinó la infiltración básica en $8,8$ mm/hora, mediante la ecuación (1). Según este valor el suelo pertenece a la familia de infiltración $0,35$ de la familia de curvas del Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura

de los Estados Unidos y corresponde a un suelo con velocidad de infiltración lenta según Walker (2003).

En la Figura 4 se presenta el balance hídrico teórico a partir del cual se definieron los momentos de riego.

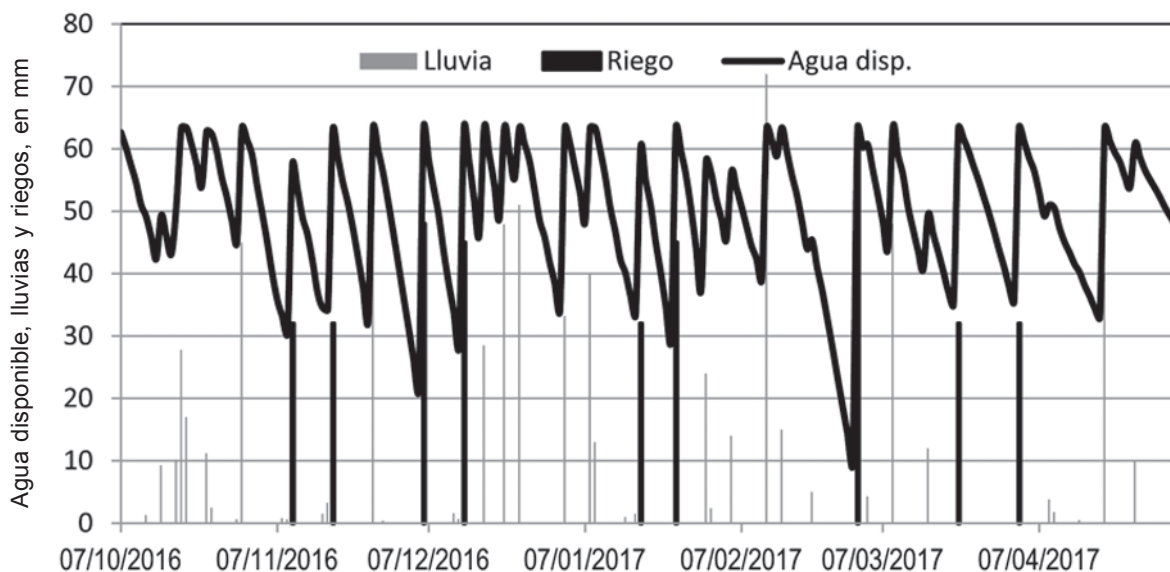
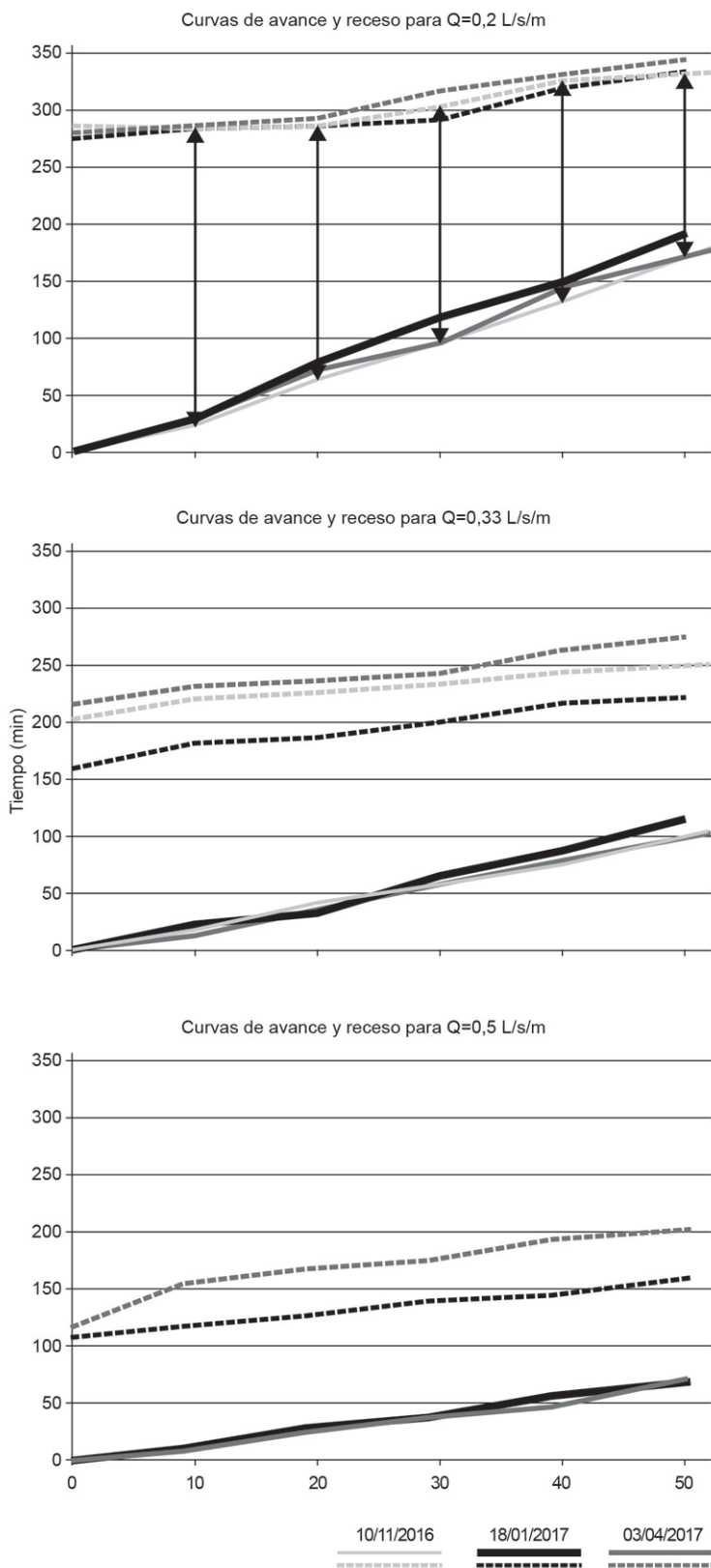


Figura 4. Balance hídrico teórico para definir las fechas de riego, evolución del agua disponible, lluvias y riegos efectuados.

Figura 5. Curvas de avance y receso para los caudales unitarios 0,2; 0,33 y 0,5 L/s/m en las tres fechas de evaluación. Las flechas indican el tiempo de oportunidad.



Durante los meses de octubre y febrero no fue necesario aplicar ningún riego. En octubre llovió 130 mm distribuidos en 10 eventos (Figura 4) y en febrero la demanda atmosférica fue baja, con valores de ETo que no superaron los 4,7 mm/día y llovió 108 mm distribuidos en cinco eventos.

Existieron cuatro fechas en las que se debió regar con LN mayores a 32 mm debido a que el AD descendió por debajo del umbral prefijado (Figura 4). Con la finalidad de tener como única variable los caudales unitarios, estas fechas fueron descartadas para realizar las evaluaciones a campo.

Las fechas de evaluación de los riegos fueron: 10/11/16, 18/01/17 y 03/04/17. En la primera fecha solo se pudieron evaluar los caudales unitarios 0,2 L/s/m y 0,33 L/s/m.

Los mm de riego neto aplicados en el período octubre-abril fueron 358 mm, mientras que el registro de lluvia total fue 663 mm y la ETc del mismo período fue 759 mm. Las lluvias cubrieron solo el 53 % de los requerimientos hídricos de las pasturas como consecuencia de la concentración de los eventos y la magnitud de los mismos. Se determinaron las curvas de avance y de receso para los caudales evaluados (Figura 5), el tiempo entre ambas curvas corresponde al tiempo de oportunidad.

Como se puede observar en la Figura 5 en las tres fechas de evaluación existió coincidencia tanto en las curvas de avance como en las curvas de receso para el caudal unitario 0,2 L/s/m, a pesar de haber realizado las determinaciones en tres melgas diferentes y en tres momentos diferentes. Los tiempos de avance promedio para cada caudal hasta los 50 m fueron: 195, 106 y 68 min, para los caudales Q1, Q2 y Q3 respectivamente.

Los tiempos de oportunidad promedio en cabecera fueron 278 min; 192 min y 115 min; mientras que los tiempos de oportunidad promedio al pie de la melga fueron: 154 min; 141 min y 114 min respectivamente para los caudales Q1, Q2 y Q3. A medida que aumentó el caudal disminuyó la diferencia entre el tiempo de oportunidad en cabecera y al pie, pasando de 45 % de varia-

ción para Q1 a 0,1 % de variación para Q3. Esto se tradujo en un mayor valor de UD a medida que aumentó el caudal (Cuadro 3).

La lámina bruta fue en promedio 62 mm para los tres caudales evaluados (Cuadro 2). La lámina infiltrada promedio fue menor a medida que aumentó el caudal evaluado 51, 40 y 35 mm, para Q1, Q2 y Q3 respectivamente. Esto se debió a la disminución del tiempo de oportunidad a medida que aumentó el caudal de entrada (Figura 5). En cambio la lámina escurrida promedio aumentó al aumentar los caudales de entrada (Cuadro 2).

La LN que efectivamente quedó almacenada en la profundidad radical fue menor a la pretendida LN_r. Las determinaciones de humedad antes de los riegos indicaron que el suelo estaba más húmedo que lo predicho por el balance hídrico con un menor agotamiento de agua disponible, por lo tanto la LN incorporada fue menor a 32 mm, entre 21 y 26 mm (Cuadro 2).

Para futuros ensayos se plantea chequear el balance hídrico con medidas de humedad periódicas. De esta forma se podrá ajustar y minimizar las incertidumbres en los distintos términos del balance. En este sentido, uno de los términos con incertidumbre es la evapotranspiración de la pastura mezcla, como consecuencia del uso de un Kc estimado. Este valor evoluciona desde un valor mínimo inmediato al corte hasta un valor máximo, si bien esto fue tenido en cuenta en nuestro balance el valor máximo y mínimo podrían estar sobreestimados.

Asimismo sería conveniente en futuras evaluaciones implementar una cuadrícula de puntos a monitorear con sonda de neutrones o sonda FDR para poder realizar ambas medidas (antes y después del riego) en los mismos puntos y eliminar la variabilidad espacial.

En la Figura 6 se presentan los hidrogramas de entrada y salida para los caudales unitarios 0,2; 0,33 y 0,5 L/s/m respectivamente. El área bajo la curva de los hidrogramas de entrada y de salida corresponde al volumen total

Cuadro 2. Lámina bruta (LB), lámina neta (LN); lámina escurrida (Lesc) y lámina infiltrada (Linf), por caudal y por riego.

	Q1= 0,2 L/s/m			Q2= 0,33 L/s/m			Q3= 0,5 L/s/m	
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R2	R3
LB (mm)	55	61	62	66	59	71	62	59
LN (mm)	21	22	21	25	25	25	25	26
Lesc (mm)	14	4	9	24	23	29	25	27
Linf (mm)	41	57	53	42	36	42	37	32

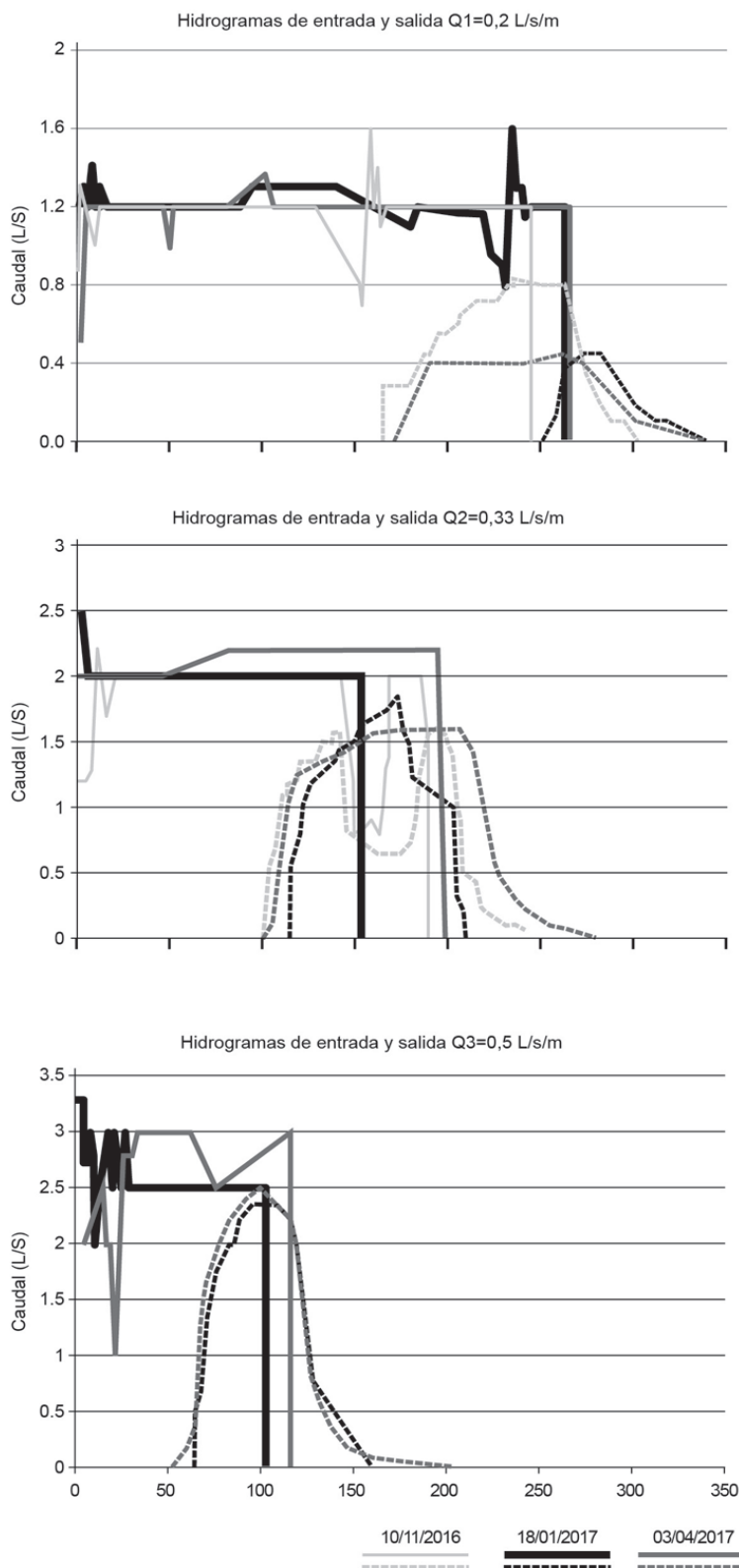


Figura 6. Hidrogramas de entrada (línea llena) y salida (línea punteada) para los caudales unitarios 0,2 L/s/m (Q1); 0,33 L/s/m (Q2) y 0,5 L/s/m (Q3).

aplicado y volumen total escurrido en cada evento respectivamente. Los volúmenes escurridos promedio para los caudales Q1, Q2 y Q3 correspondieron al 15, 38 y 43 % del volumen total aplicado, respectivamente (Cuadro 3).

Simulaciones realizadas con el modelo WinSRFR

En el Cuadro 3 se observan los valores medidos a campo y los simulados por el modelo en el módulo Análisis de Eventos. Como se puede observar el modelo copia exactamente las pérdidas por escurrimiento en todos los eventos de riego evaluados. Esto estaría indicando una buena estimación de la infiltración total hecha por el modelo mediante balance de volúmenes y la UD está estrechamente vinculada a este parámetro. El Q3 fue el que alcanzó mayor UD, a consecuencia del igual tiempo de oportunidad registrado entre cabecera y pie (Figura 5).

La buena predicción del modelo se puede observar en la Figura 7 y Figura 8 que a modo de ejemplo se presentan para el Q2, donde se observa que existió una coincidencia muy buena entre las curvas de avance y receso medidas y simuladas (Figura 7) así como entre el hidrograma de salida medido y simulado (Figura 8).

Sin embargo no hubo coincidencia entre la EA medida y la simulada. La EA simulada fue más alta que la medida, debido a que la LN_i 32 mm fue mayor a la incorporada realmente. Este resultado se debió a que la humedad del suelo al momento de regar fue mayor al umbral de riego definido previamente. Si se hubiesen dejado agotar los 32 mm, el valor de EA medido a campo hubiese sido más alto acercándose al valor de EA previsto por el modelo.

Cuadro 3. Indicadores de desempeño medidos y simulados por el modelo y bondad del modelo, R^2 , para los caudales evaluados en las tres fechas de riego.

10/11/2016	Q1= 0,2 L/s/m		Q2= 0,33 L/s/m			
	Medido	Simulado	Medido	Simulado		
EA %	39	56	38	47		
UD %	91	93	94	95		
Percolación %	36	20	27	17		
Escurrimiento %	25	24	35	36		
R^2	0,91		0,56			
18/01/2017	Q1= 0,2 L/s/m		Q2= 0,33 L/s/m		Q3= 0,5 L/s/m	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
EA %	35	49	43	51	40	52
UD %	90	92	95	95	97	98
Percolación %	59	46	18	10	19	0
Escurrimiento %	6	6	39	39	48	49
R^2	0,68		0,91		0,78	
03/04/2017	Q1= 0,2 L/s/m		Q2= 0,33 L/s/m		Q3= 0,5 L/s/m	
	Medido	Simulado	Medido	Simulado	Medido	Simulado
EA %	34	49	35	44	44	51
UD %	92	92	97	98	100	99
Percolación %	52	37	24	14	10	44
Escurrimiento %	15	15	41	42	46	45
R^2	0,26		0,61		0,43	

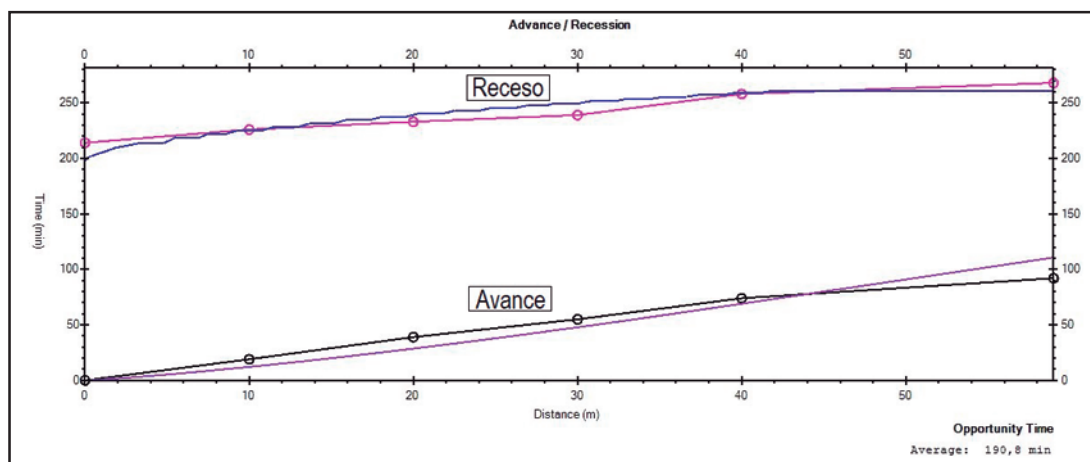


Figura 7. Curvas de avance y receso medidas (líneas con puntos) y simuladas por el modelo (líneas). Riego con $Q_2 = 0,33$ L/s/m, fecha 3/04/2017.

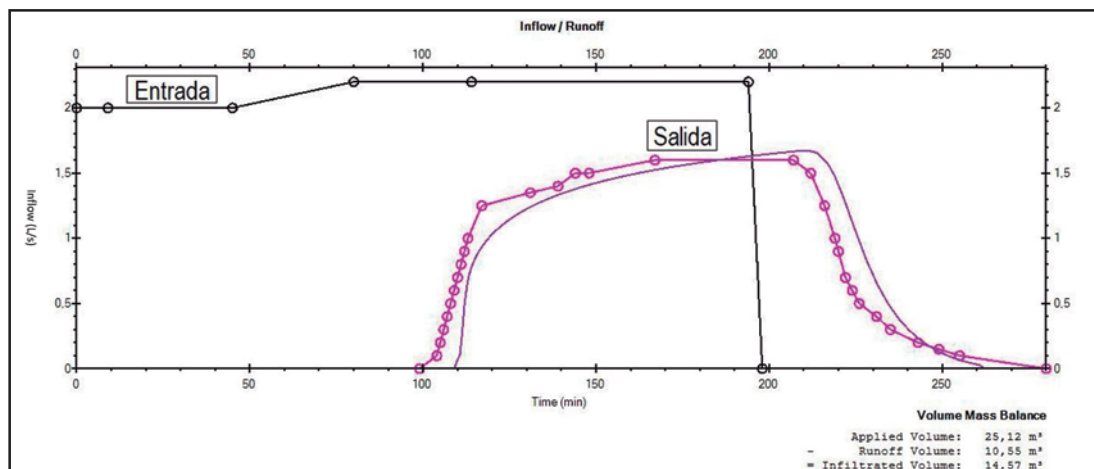


Figura 8. Hidrograma de entrada medido (línea con puntos) e hidrograma de salida medido (línea con puntos) y simulado (línea) por el modelo. Riego con $Q_2 = 0,33$ L/s/m, fecha 3/04/2017.

Optimización del riego usando el modelo

El modelo permite dos formas de optimizar el riego: mediante el ajuste del tiempo de riego y/o caudal de entrada (módulo Análisis Operacional) o mediante el ajuste de las dimensiones de las melgas (módulo de Diseño Físico).

Para la optimización se utilizaron aquellas simulaciones que tuvieron el mejor ajuste, mayor R^2 , entre los datos medidos y parámetros estimados. Estas fueron para Q_1 en la fecha de riego 10/11/16 ($R^2 = 0,91$), para Q_2 en la fecha de riego 18/01/17 ($R^2 = 0,91$) y para Q_3 en la fecha 3/04/17 ($R^2 = 0,78$).

Optimización por ajuste del tiempo de riego

El módulo Análisis Operacional permite optimizar el tiempo de riego en función del caudal usado. Maximiza la efi-

ciencia de aplicación, cumpliendo con la condición: lámina mínima infiltrada igual a la requerida (Bautista et al., 2009a), en nuestro caso 32 mm.

En la Figura 9 se puede observar que el tiempo de riego o de corte optimizado para el Q_1 , es 186 min, con una EA de 72 %. Según este resultado habría una mejora potencial de la EA de 16 %, por sobre el valor de eficiencia obtenido en el módulo Análisis de Evento, 56 %. Esta sería la mejora potencial de la EA ajustando el tiempo de riego y cumpliendo la condición de lámina requerida al pie de la melga. El tiempo de riego optimizado, 186 min, corresponde a cortar el caudal de entrada cuando el agua alcance el pie de la melga (Figura 5).

En la Figura 10 se puede observar que el tiempo de riego o de corte optimizado para el Q_2 es 118 min, con una

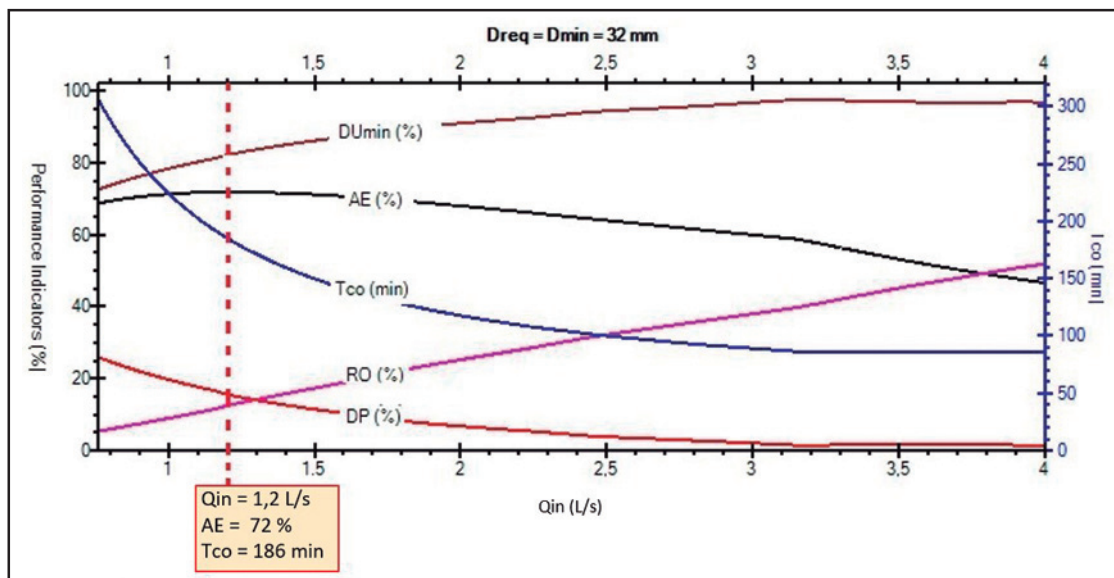


Figura 9. Curvas de optimización obtenidas con el módulo Análisis Operacional para la condición lámina infiltrada mínima igual a la lámina neta (32 mm). Con la línea punteada se indica la optimización para el caudal de entrada 1,2 L/s correspondiente al Q1

EA de 68 %. Cuando comparamos la EA estimada en el Análisis de Evento, 51 % (Cuadro 3) con la obtenida por el modelo en la optimización hay una diferencia de 17 %. Esta sería la mejora potencial de la EA ajustando el tiempo de riego. Dicha condición establece necesariamente que exis-

ta escurrimiento al pie, lo cual asegura una UD alta. El tiempo optimizado, 118 min, establece la pauta para el operador del riego de cortar el caudal de entrada cuando el agua haya llegado al pie de la melga (Figura 5). Esto significó una reducción del tiempo de riego de un 23 % con respecto al

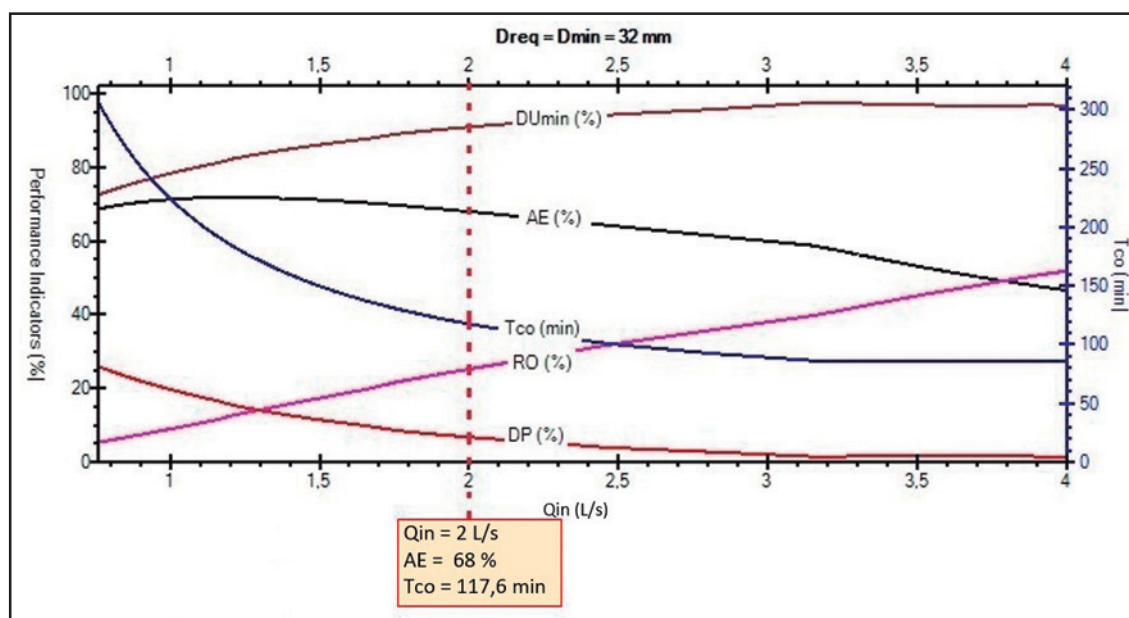


Figura 10. Curvas de optimización obtenidas con el módulo Análisis Operacional para la condición lámina infiltrada mínima igual a la lámina neta (32 mm). Con la línea punteada se indica la optimización para el caudal de entrada 2 L/s correspondiente al Q2

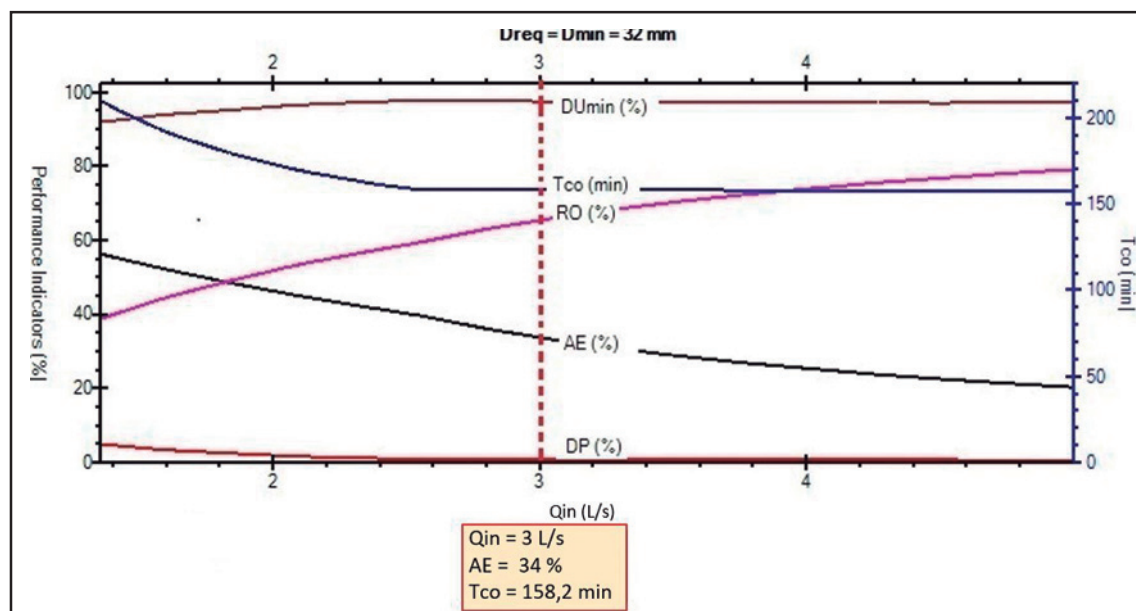


Figura 11. Curvas de optimización obtenidas con el módulo Análisis Operacional para la condición lámina infiltrada mínima igual a la lámina neta (32 mm). Con la línea punteada se indica la optimización para el caudal de entrada 3 L/s correspondiente al Q3

evento de campo, lo cual incide directamente en el costo operativo (mano de obra) además del ahorro de agua.

La eficiencia máxima con el Q3 cuando se pretende aplicar la LN al pie de la melga fue 34 %. Para ello el tiempo de corte debería ser 158 min. En la simulación realizada con el módulo Análisis de Evento la eficiencia fue de 42 % (Cuadro 3), con un tiempo de riego de 104 min. Cabe destacar que en contraste con los otros dos caudales el tiempo optimizado fue mayor, de lo contrario no se incorpora la LN_i al pie (Figura 11).

Optimización por ajuste del largo de la melga

La otra forma de optimizar el riego es variando las dimensiones de la melga. En nuestro estudio el ancho se dejó fijo y solo se varió el largo de la melga.

En el módulo Diseño Físico se identificó el rango de máximos valores de EA en función del largo. Luego se analizaron los indicadores de desempeño EA y UD, para la condición: Lámina mínima = LN_i (32 mm), en el módulo Simulación.

Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro 4. Como se puede apreciar en este cuadro, el Q1 es el que tendría una menor EA para las condiciones simuladas. Cabe destacar que el tiempo de corte para la longitud máxima es muy largo y por tanto no es una solución recomendada.

Al variar la longitud el Q3 levantaría la limitante de la baja EA mencionada en la optimización por tiempo de corte con las dimensiones de melgas del ensayo de campo. Bautista et al. (2009a) indicaron que cuando no se consiguen valores razonables de EA en la optimización por tiempo de

Cuadro 4. Resultados de la optimización por longitud de melga. Longitud máxima para la condición Lmin=LN_i.

	Q1= 0,2 L/s/m	Q2= 0,33 L/s/m	Q3= 0,5 L/s/m
Longitud máxima (m), Lmin=LN _i	100	83	170
Tiempo de corte (min)	411	183	241
EA %	63	73	73
UD %	80	88	90

corte, se deben analizar alternativas modificando las dimensiones de las melgas.

Recomendación de diseño y estrategia de manejo del riego

Para la condición de suelos con pastura, velocidad de infiltración baja, pendiente del 3 % y largo de ladera de 50-60 m, se recomienda el caudal unitario 0,2 L/s/m. Con este caudal unitario se podría mejorar la EA potencial ajustando el tiempo de riego, cortando la entrada de agua cuando llegue al pie. Sin embargo este caudal no se recomendaría para largos mayores de melga.

El caudal 0,5 L/s/m no tuvo un buen desempeño en el largo de ladera 50-60 m. Pero según la optimización podría alcanzar un valor alto de EA para una longitud de 170 m, con un tiempo de corte de 241 min.

El caudal 0,33 L/s/m tendría un buen desempeño tanto en melgas cortas como en melgas más largas. Pero alcanzaría su mejor desempeño con un largo de 83 m y un tiempo de riego a 183 min. En el caso de melgas de 50-60 m su mejor desempeño lo alcanza si se corta la entrada de agua cuando llega al pie. Este caudal podría ser la mejor solución en zonas donde la ladera tiene longitud variable, permitiendo mantener valores de eficiencia de aplicación altos (70-80 %), modificando el tiempo de riego.

Conclusiones

Los caudales con mejor desempeño fueron más bajos que los recomendados por la bibliografía internacional. El modelo predijo muy bien el volumen infiltrado y escurrido, a partir de los datos de entrada medidos a campo para la confección de la curva de avance, curva de receso, hidrograma de entrada e hidrograma de salida.

Para la optimización se deben usar aquellos eventos que tengan un buen ajuste entre los datos medidos y simulados por el modelo, de lo contrario los resultados son erráticos. Para los suelos con cobertura de pastura, pendiente del 3 %, velocidad de infiltración baja y largo de ladera de 50-60 m el caudal unitario 0,2 L/s/m es el que tuvo la mejor respuesta a la optimización por tiempo de corte. El caudal unitario 0,5 L/s/m alcanzó las mejores eficiencias con largos de melga en el entorno de 170 m, para estas mismas condiciones de suelos y pendientes. El caudal 0,33 L/s/m podría ser la mejor solución en zonas donde la ladera tiene longitud variable, permitiendo alcanzar alta eficiencia de aplicación mediante la modificación del tiempo de riego.

Para validar los valores optimizados por el modelo tanto por tiempo como por longitud de melga se propone reproducir los riegos a campo y verificar los parámetros de

desempeño en un suelo con las mismas características al de este estudio. Para validar la optimización por longitud será necesario plantear un ensayo con mayor longitud de melgas, con similares condiciones de sistematización y conformación de bordos.

Bibliografía

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO. (Irrigation and Drainage Paper, N° 56).
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. y Niblack, M. (2009a). Analysis of surface irrigation systems with WinSRFR-Example application. *Agricultural Water Management*, 96, 1162-1169.
- Bautista, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. y Schlegel, J. (2009b). Modern analysis of surface irrigation systems with WinSRFR. *Agricultural Water Management*, 96, 1146-1154.
- Bautista, E., Schlegel, J. L. y Strelkoff, T. S (2012). *WinSRFR4.1.3 User Manual*. Washington: USDA.
- Durán, P. y García Petillo, M. (2007). Desarrollo de tecnologías apropiadas para riego por surcos en terrazas paralelas y tierras con pendiente. *Ingeniería del agua*, 14(3), 187-198.
- García Petillo, M. (2011). Análisis crítico del riego por gravedad en las condiciones del Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15(2), 76-82.
- García Petillo, M., Puppo, L., Hayashi, R. y Morales, P. (2012). *Metodología para determinar los parámetros hídricos de un suelo a campo*. Recuperado de <http://www.fagro.edu.uy/~hidrologia/riego/Metodologia%20para%20determinar%20los%20parametros%20hidricos%20de%20un%20suelo%20a%20campo.pdf>
- Hart, W. E., Collins, H. G., Woodward, G. y Humpherys, A. S. (1980). Design and operation of gravity or surface systems. En M. E. Jensen (Eds.). *Design and operation of farm irrigation systems* (pp. 663-717). St. Joseph Michigan: ASAE.
- Martínez, R., Prieto, D., Antúnez, A., Pla, M. y Zelmer, H. (2016). *Evaluación del Riego Superficial como herramienta para el mejoramiento del diseño y operación de los sistemas*. Recuperado de <https://docplayer.es/54354499-Evaluacion-del-riego-superficial-como-herramienta-para-el-mejoramiento-del-diseño-y-operación-de-los-sistemas.html>
- Morábito, J., Salatino, S., Angella, G. y Prieto, D. (2008). *Evaluación de campo al riego de los agricultores: Casos prácticos y ventajas para la difusión de la tecnología apropiada; asesoramiento a los regantes para la modernización de los regadíos y su ambientalidad*. Trabajo presentado en las Jornadas sobre Ambiente y Riegos: Modernización y Ambientalidad, La Antigua, Guatemala.
- Pascual, B. (1990). *El riego: Principios y prácticas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Pereira, L. S., de Juan, J. A., Picornell, M. R. y Tarjuelo, J. M. (2010). *El riego y sus tecnologías*. Albacete: CREA-UCLM.
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F. y Durán, A. (1988). *Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay*. Montevideo: Facultad de Agronomía. (Boletín de Investigación, 10).
- Strelkoff, T. (1990). *SRFR: A computer program for Simulation Flow in Surface Irrigation Furrows-Basins-Borders* (WCL Report 17). Phoenix, Ariz.: USDA
- Walker, R. (2003). *Simulación, diseño y evaluación de riego por superficie: Guía del curso y documentación técnica*. Utah: Utah State University.