

MODELO DE MANEJO Y CONTROL EN TIEMPO REAL DEL RIEGO POR SURCOS*

Emilio Camacho, Carlos Pérez, José Roldán y Miguel Alcaide¹

RESUMEN: En este artículo se presenta un modelo integral de manejo del riego por surcos (MEPI) (Pérez, 1994). Una serie de sensores se colocan a lo largo del surco para detectar el tiempo de avance y el tiempo de receso. Mediante una línea de transmisión a dos hilos, las señales son enviadas a un ordenador. Un método de balance de volumen estima inicialmente los parámetros de infiltración de la ecuación de Kostiakov-Lewis. Con estos parámetros se inicializa un método de optimización simplex. Este método de búsqueda consta de un modelo de onda cinemática que permitirá realizar la simulación del riego, comparándose posteriormente los datos de avance de la simulación con los datos reales observados. Los parámetros de infiltración iniciales son modificados hasta minimizar la diferencia entre los datos simulados y los observados. Una vez obtenidos los parámetros de infiltración del riego se entraría en la fase de manejo del modelo MEPI estableciendo éste de forma automática los recortes de caudal a dar y el tiempo de aplicación del riego. El modelo MEPI tiene en cuenta en todos sus cálculos la variabilidad espacial y temporal de la infiltración ajustándose, por tanto, de una forma más exacta a la infiltración real. Este manejo y control del riego a través del modelo MEPI ha permitido obtener altos rendimientos de aplicación.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de riego por superficie son los más usados en el mundo, siendo habitual que el rendimiento de estos sistemas sea del 40 al 60 por ciento o incluso menos (Kruse y Heermann, 1977). Los sistemas de riego por superficie que aplican de forma ideal el agua consiguen rendimientos del orden del 70 al 85 por ciento (Merriam y Keller, 1978). Estos bajos rendimientos que consiguen los sistemas de riego por superficie se deben fundamentalmente a un mal manejo del riego condicionado por una alta variabilidad espacial y temporal en cuanto a las características del suelo. Esto, unido a un conocimiento no exacto de las características de infiltración del suelo originan un mal manejo del riego y, por tanto, bajos rendimientos de aplicación.

Las medidas directas de infiltración del suelo a través del infiltrómetro de doble anillo o a través del infiltrómetro de surco bloqueado pueden no representar de una forma exacta la infiltración a lo largo del surco debido a la variabilidad espacial que puede haber en el suelo. En este sentido, medidas de la infiltración a partir de los datos de avance (problema inverso) son más representativas de la infiltración real.

Por su simplicidad, las ecuaciones de infiltración más interesantes son la de Kostiakov y Philip. Clemmens (1983) mostró que las ecuaciones empíricas se adaptan

mejor a la infiltración en campo que las ecuaciones teóricas. De las ecuaciones empíricas la menos compleja es la de Kostiakov. Philip (1957) señaló que la ecuación de Kostiakov predecía bastante bien la infiltración si los tiempos no son muy grandes. Puesto que esto a veces no ocurre en riego por surcos la ecuación de Kostiakov fue modificada introduciendo en ella un término de infiltración básica que tuviera en cuenta la infiltración para tiempos grandes. De esta forma surgió la ecuación de Kostiakov-Lewis.

Casi todas las ecuaciones de infiltración son dependientes del tiempo de contacto solamente; esto en un riego por inundación predice de forma adecuada la infiltración. En un riego por surcos el volumen de agua infiltrado depende del perímetro mojado (Samani, 1983; Strelkoff y Souza, 1984). Ley (1978) y Fangmeyer y Ramsey (1978) encontraron que la infiltración depende de forma lineal del perímetro mojado. Samani (1985) comprobó cómo existe una relación entre la infiltración, el calado y el perímetro mojado. Schwankl y Wallender (1988) comprobaron que la infiltración depende del perímetro mojado y que esta dependencia tiene un impacto importante en la distribución final de agua.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, se ha tenido en cuenta en este estudio esta dependencia de la infiltración con el perímetro mojado.

¹Departamento de Agronomía. E.T.S.I. Agrónomos y Montes. Apdo. 3048, 14080 Córdoba. Universidad de Córdoba.
e-mail: jroldan@lucano.uco.es

* Parcialmente publicado en *Journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE)*, 123 (4), pp. 264-269.

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.4 Num.4 (diciembre 1997), páginas 11-18, recibido el 10 de septiembre de 1997 y aceptado para su publicación el 21 de septiembre de 1997. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

Walker and Willardson (1983) modelizaron la ecuación de infiltración dependiendo del perímetro mojado y señalaron dos posibles soluciones. Una usando un infiltómetro de surco bloqueado de recirculación y otra usando un método de balance de volumen. La gran ventaja de la segunda es que puede ser aplicada directamente sobre el riego y representa, además, a toda la longitud del surco.

Christiansen y col. (1966) desarrollaron un método para la estimación de los parámetros de infiltración usando una infiltración media basada en tiempos de avance y distancias. Elliott y Walker (1980) desarrollaron un método de balance de volumen basado en la asunción de un área media de la sección transversal del flujo. Reddell y Latortue (1986) desarrollaron una técnica de balance de volumen que hace posible evaluar matemáticamente el área media de la sección transversal del flujo, a partir de los datos de avance y receso. Scaloppi y col. (1995) han desarrollado otro modelo de balance de volumen que estima los parámetros de infiltración de la ecuación de Kostiakov-Lewis a partir de datos medidos de la fase de avance, de la fase de postavance o de ambas.

Los métodos de balance de volumen, si bien tienen en cuenta el efecto del perímetro mojado en la infiltración, consideran una sección media por lo que no tienen en cuenta la diferencia de calados y de perímetros que hay a lo largo del surco. Por esto, se ha desarrollado un modelo mixto. Inicialmente se aplica un modelo de balance de volumen para posteriormente aplicar un modelo de onda cinemática que sí tiene en cuenta la variabilidad del calado a lo largo del surco.

El término "tiempo real" en el análisis de los parámetros de campo de un riego por surcos significa técnicamente que la información sobre el riego es recogida, estudiada y procesada, actuando en consecuencia sobre el propio riego y evaluando posteriormente el resultado del mismo. La información puede ser obtenida a partir de los datos de avance o de receso o a partir de la escorrentía. Smith y Duke (1984) modificaron el método de los dos puntos propuestos por Elliott y Walker (1980) para determinar las características de infiltración a partir de medidas en tiempo real de la fase de avance. Ellos desarrollaron un sistema de sensores remotos para medir automáticamente el tiempo de avance y analizaron la localización óptima para estos sensores valiéndose del modelo de onda cinemática desarrollado por Walker y Humpherys (1983). Para un sistema de dos sensores, la mejor localización fue a un 40% y a un 60% de la longitud de la parcela (Elliott y Eisenhauer, 1983).

El modelo ARFIS desarrollado por Reddell y Latimer (1986) para riego por surcos, está basado en un balance de volumen en dos puntos y desprecia el almacenamiento superficial. Las medidas de avance de los dos puntos fueron automatizadas mediante un sistema de infrarrojos que transfería los datos a un ordenador, el cual decidía cuándo debía terminar el riego.

Izadi y Heermann (1987) también usaron el método de los dos puntos para determinar la infiltración en tiempo real de un riego por pulsaciones junto con el modelo de

onda cinemática y mediante un procedimiento de prueba y error ajustar los parámetros de la ecuación de Kostiakov modificada a partir de los datos medidos de avance. Walker y Busman (1990) desarrollaron un modelo de simulación y optimización en tiempo real en el que combinaban el modelo de onda cinemática y una técnica de optimización simplex que minimiza la diferencia de los tiempos de avance simulados y medidos. Ellos ajustaron los tres parámetros de la ecuación de Kostiakov modificada.

Bautista y Wallender (1991) usaron la aproximación del modelo hidrodinámico basada en un esquema implícito de Preissman de diferencia finitas, junto con un procedimiento estándar de mínimos cuadrados para la estimación de parámetros no lineales (Marquardt, 1963). Este modelo asumía una infiltración variable con el perímetro mojado. Azevedo (1992) desarrolló un modelo de ordenador de optimización y simulación, SIRTON, mediante varios procedimientos para estimar en tiempo real los parámetros de infiltración a partir de los datos de avance.

Varios son los algoritmos de optimización desarrollados para resolver el problema inverso. Walker y Busman (1990) aplicaron el método de *Downhill Simplex* de Nelder y Mead (1965), consiguiendo múltiples soluciones para los tres parámetros desconocidos. Katapodes (1990) intentó dos técnicas, una técnica llamada método descendente de máxima pendiente y otra técnica de métrica variable llamada BFGS, pero tan sólo obtuvo con datos de avance un parámetro de la ecuación de Kostiakov. Bautista y Wallender (1991) se inclinaron por una técnica de búsqueda en mínimos cuadrados pero encontraron gran dificultad en determinar los tres parámetros de Kostiakov-Lewis.

Azevedo (1992) utiliza un procedimiento combinado de optimización. Con el método de los dos puntos obtiene unos parámetros iniciales que usa para inicializar una técnica de minimización multidimensional llamada método Powell el cual, combinado con un modelo de onda cinemática, permite obtener la mejor dirección. Posteriormente, y usando una técnica de optimización unidimensional llamada método de Brent, permite obtener los parámetros k y f_0 de la ecuación de Kostiakov-Lewis. El parámetro a es el determinado inicialmente por el método de los dos puntos.

En este estudio se ha usado un método de balance de volumen para obtener unos valores iniciales de la ecuación de Kostiakov. La infiltración básica ha sido calculada previamente mediante otros procedimientos. Con estos valores iniciales de infiltración hemos inicializado el método de optimización simplex combinado junto a un modelo de onda cinemática, con lo cual se obtienen los parámetros de infiltración de ese riego. Esto permitirá aplicar los recortes necesarios para que no haya excesivas pérdidas por escorrentía y determinar el tiempo de riego. Además, el modelo MEPI tiene en cuenta la variabilidad espacial y temporal de la infiltración (Camacho y col., 1995). Posteriormente al riego se realizaba una evaluación del mismo.

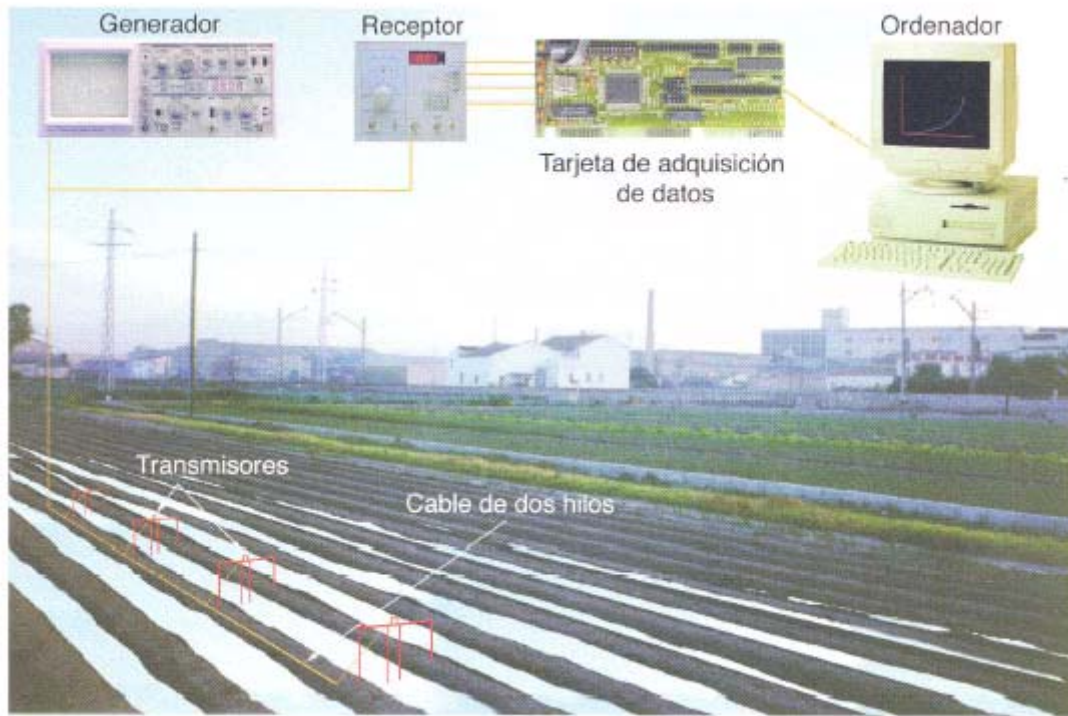


Figura 1. Representación general del sistema de adquisición y proceso de datos

TEORÍA DEL MODELO

Adquisición de datos

Los tiempos de avance y de receso son registrados por unos sensores distribuidos a lo largo del surco. Dichos sensores están compuestos por dos varillas metálicas unidas a un arquillo que se clava en los lomos del surco. Los sensores van conectados a unos transmisores y cuando llega el agua pone en contacto los dos sensores cerrando el contacto del transmisor, el cual manda una señal en un determinado canal a través de un cable de dos hilos a un generador de canales (Camacho y col., 1994).

El generador de canales, corazón del sistema, genera la portadora que permite la intercomunicación de todos los elementos variables en base al principio multiplex de división cíclica de tiempos. Un receptor de canales detecta si ha habido alguna modificación en alguno de los canales del sistema. Si así fuera descubre rápidamente qué canal ha sido, es decir, qué transmisor ha sido activado. El receptor está conectado por medio de unos relés a una tarjeta de adquisición de datos que, a su vez, sirve de comunicación con el ordenador (ver Figura 1). De esta forma se detecta en el ordenador de forma inmediata tanto el frente de avance como el de receso.

A medida que se van registrando los datos de avance en el ordenador, un método de balance de volumen es aplicado entre los puntos en los que ya se ha producido el avance determinándose unos parámetros de infiltración para las primeras fases del mismo. Cuando se completa el avance se aplica de nuevo el modelo de balance de volumen con todos los datos de avance y se inicializa un método de optimización simplex, tal como puede verse en la Figura 2.

Balance de volumen

Con el método de balance de volumen se determina de una forma fácil y rápida los parámetros de infiltración (Blair y Smerdon, 1988; De Tar, 1990; Camacho y col., 1993). La ecuación de infiltración a determinar es la de Kostiakov-Lewis:

$$z_i = k t_{ci}^a + f_0 t_{ci} \tag{1}$$

donde:

z_i = infiltración acumulada para el punto i , m;
 t_{ci} = tiempo de contacto para ese punto, min; a, k = parámetros empíricos; f_0 = infiltración básica.

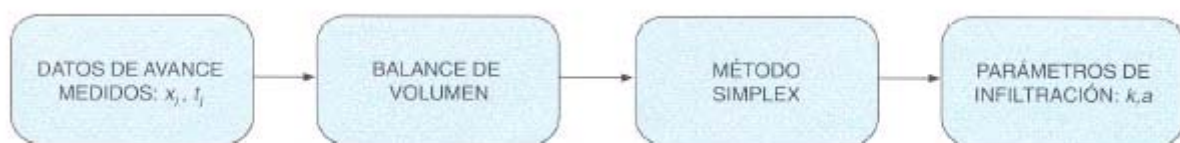


Figura 2. Organigrama de cálculo del modelo MEPI

De la ecuación (1) son desconocidos k y a . Se parte de un valor conocido de f_0 , el cual puede determinarse mediante otros procedimientos, bien de datos conocidos en la bibliografía o bien conociendo el caudal de entrada y el caudal de salida estabilizado considerando el surco como un infiltrómetro (Walker y Skogerboe, 1987), obteniendo f_0 de mediante la ecuación:

$$f_0 = \frac{Q_0 - Q_e}{L} \quad (2)$$

donde:

Q_0 = caudal de entrada, m^3/min ; Q_e = caudal de salida estabilizado en el surco, m^3/min ; L = longitud del surco, m .

Método simplex

Esta técnica se debe a Nelder y Mead (1965) y tiene la ventaja de ser capaz de optimizar funciones complejas donde la determinación de derivadas parciales con respecto a las variables de interés puede ser imposible o, al menos, muy difícil. El método simplex se basa en una figura geométrica en N dimensiones de $N+1$ puntos o vértices. En dos dimensiones, como es nuestro caso, esta figura será un triángulo.

El método simplex (Press y col., 1989) evalúa la función que está siendo optimizada en cada uno de los vértices de la figura. Luego refleja el peor vértice a través del centroide de la figura en un intento de encontrar un mejor valor de la función objetivo. Si falla esta búsqueda de un mejor valor a lo largo de la línea reflejada, se hará una reducción de la figura entera hacia el centroide y luego la reflexión es repetida. Este proceso asegura una progresión hacia el óptimo sin derivadas, requeridas normalmente en proceso de optimización de tipo gradiente. En el procedimiento simplex tradicional, la figura conserva su regularidad durante el proceso de búsqueda.

La función objetivo evaluada en cada uno de los vértices de la figura será:

$$Y_j = \sum_{i=1}^m (t_i - t_{k_i})^2 \quad ; \quad j=1, \dots, n+1 \quad (3)$$

donde:

t_i = tiempos de avance medidos; t_{k_i} = tiempos de avance simulados; m = número de puntos que se elijan para comparar los tiempos; n = número de parámetros a estimar.

La función objetivo de la ecuación (3) se calcula tal como se detalla en el organigrama de la Figura 3.

El modelo de onda cinemática está basado en la resolución de las ecuaciones de Saint-Venant, siendo en este caso la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial Z}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

donde:

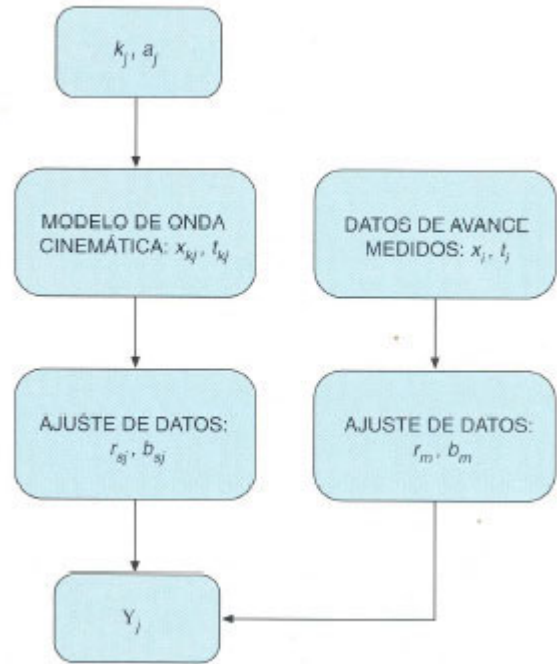


Figura 3. Organigrama del cálculo de la función objetivo

A = área de la sección transversal, m^2 ; Q = caudal, m^3/min ; t = tiempo transcurrido, min ; x = distancia desde la cabecera del surco, m ; Z = volumen de infiltración acumulado por metro de longitud del surco, m^3/min .

Aparte de la ecuación (4), la ecuación de Manning es usada para obtener una relación entre el caudal y la sección hidráulica. Elliott y col. (1982) propusieron una relación como la siguiente:

$$A^2 R^{4/3} = \rho_1 A^{\rho_2} \quad (5)$$

siendo:

R = radio hidráulico; ρ_1 y ρ_2 = parámetros empíricos dados por:

$$\rho_1 = \frac{10}{\sigma_1^3} \rho_2 \quad (6)$$

$$\rho_2 = \frac{10}{3} - \frac{4}{3} \frac{\gamma_2}{\sigma_2} \quad (7)$$

A su vez, σ_1 , σ_2 , γ_1 y γ_2 son parámetros empíricos que describen la relación entre el área y perímetro mojado respectivamente con el calado:

$$A = \sigma_1 \gamma^{\sigma_2} \quad (8)$$

$$WP = Y_1 \gamma^{\gamma_2} \quad (9)$$

Expresando la ecuación de Manning en la forma:

$$Q = \alpha A^{m+1} \quad (10)$$

siendo:

$$\alpha = \frac{(\rho_1 I_0)^{0.5}}{n} \quad (11)$$

$$m + 1 = \frac{\rho_2}{2} \quad (12)$$

La integración de las ecuaciones (4) y (10) se hace aplicando el volumen de control deformable y realizando un cálculo enmallado Euleriano en el plano x-t (Camacho y col., 1997).

Las condiciones de contorno establecidas son:

$$\left. \begin{aligned} Q(t,0) &= 0 && ; && t \leq 0 \\ Q(t,0) &= Q_0 && ; && 0 < t < t_{co} \\ Q(t,0) &= 0 && ; && t > t_{co} \\ Q(0,x) &= 0 && ; && x \geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

siendo t_{co} el tiempo de corte.

La ecuación de infiltración usada ha tenido en cuenta la variabilidad espacial y temporal del calado y, por consiguiente, del perímetro mojado. Strelkoff y Souza (1984) calcularon la infiltración como una función del perímetro mojado, WP :

$$Z = (k t^a + f_0 t) WP \quad (14)$$

Ley (1977) consideró una variación de la infiltración con el perímetro de forma lineal. En este estudio se ha considerado una variación lineal con el perímetro y puesto que la gran variación del perímetro se produce cuando en la ecuación (14) aún lo que tiene importancia es el término potencial, se han hecho variar dentro de la ecuación de infiltración los parámetros k y f_0 :

$$k_i = k_{i-1} \frac{WP_i}{WP_{i-1}} \quad (15)$$

$$f_{0i} = f_{0i-1} \frac{WP_i}{WP_{i-1}} \quad (16)$$

De esta forma, el parámetro a permanece constante a lo largo de todo el riego y todo el surco, y k y f_0 serán función del espacio y el tiempo.

El perímetro mojado puede relacionarse con el área transversal mediante la ecuación:

$$WP = \gamma_1 \left(\frac{A}{\sigma_1} \right)^{\gamma_2 / \sigma_2} \quad (17)$$

Tiempo de corte del riego y recorte de caudal

La aplicación de agua al riego concluye cuando al final del surco se alcanza como lámina infiltrada la lámina requerida en el riego. El recorte de caudal se inicia cuando el agua llega al final del surco y, al igual que Reddell

y col. (1986) se supuso que el caudal a recortar sería igual si se desprecia el almacenamiento superficial a la velocidad media de infiltración en todo el surco durante un intervalo de tiempo, Δt :

$$Q_{cb} = \frac{Z_2 - Z_1}{60 \Delta t} \quad (18)$$

donde:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \sum_{i=1}^n [(T_1 - t_i)^a + f_0(T_1 - t_i)] dx_i \\ Z_2 &= \sum_{i=1}^n [k(T_2 - t_i)^a + f_0(T_2 - t_i)] dx_i \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

siendo:

T_1 = tiempo al comienzo del intervalo, *min*; T_2 = tiempo al final del intervalo, *min*; t_i = tiempo de avance hasta el punto i , *min*; dx_i = longitud del surco entre dos puntos, m .

APLICACIÓN DEL MODELO

Para comprobar la potencialidad de este modelo respecto a otros existentes se ha realizado una comparación con un modelo empírico y basado en ecuaciones de balance de volumen, como es el propuesto por el NRCS (antiguo SCS) (USDA, 1974; Camacho y col., 1996), y un modelo de onda cinemática como el SIRMOD (USU, 1989). Los datos del riego pertenecen a la campaña de riego de 1995 en un suelo franco con sorgo como cultivo y se muestran en las tablas 1, 2 y 3.

DISTANCIA (m)	TIEMPO (min)
0	0.0
50	10.5
100	23.0
150	35.0
200	50.0

Tabla 1. Datos de avance

Q_0 (l/s)	1.500
f_0 (m ³ /m/min)	$12 \cdot 10^{-4}$
Z_r (m)	0.030
I_0 (m/m)	0.003
S (m)	0.750
n	0.040

Tabla 2. Datos de diseño

σ_1	1.0409
σ_2	1.6383
γ_1	2.0573
γ_2	0.6618
ρ_1	0.3910
ρ_2	2.7950

Tabla 3. Datos de la geometría del surco

Este riego se realizó en campo utilizando el modelo MEPI para poder hacer, de este modo, un manejo en tiempo real del mismo. Aplicando este modelo se obtuvieron los siguientes parámetros de infiltración:

$$k = 0.00745 \text{ m}^3/\text{m}/\text{min}^a$$

$$a = 0.1418$$

Con estos parámetros de infiltración obtenidos con el modelo MEPI para este ensayo de campo, se realizó el diseño con los criterios del NRCS y una simulación con el modelo de onda cinemática del programa SIRMOD. La familia de infiltración del NRCS correspondiente a los datos de infiltración obtenidos por el modelo MEPI es $I_F = 0.8$.

En la *Tabla 4* se comparan los parámetros de calidad del riego según manejo realizado por los tres modelos:

	NRCS	SIMROD	MEPI
R _a (%)	53	58.5	63.62
C _e (%)	26.9	28.21	29.54
C _p (%)	20.12	13.28	6.84

Tabla 4. Parámetros de calidad

donde:

R_a = rendimiento de aplicación; C_e = coeficiente de pérdidas de escorrentía; C_p = coeficiente de pérdidas de percolación profunda.

La alta escorrentía alcanzada en el MEPI se debe a que la infiltración se ha calculado como variable. De esta forma la escorrentía es mayor y la infiltración es menor que la calculada con otros procedimientos.

Hay que reseñar que en el manejo del riego con el modelo MEPI se realizaron 3 recortes de caudal, mientras que con los otros dos métodos se dio un recorte solamente. En la *Figura 4* se representan las curvas de avance y receso simuladas por los tres métodos en comparación con las medidas en campo. Como puede observarse el avance es algo más lento para el NRCS y el SIRMOD, debido a que ambos consideran una infiltración constante para todo el surco, con lo cual sobreestiman ésta y el avance es más lento que el observado y el simulado con MEPI. Por este motivo los tiempos de receso simulados con SIRMOD y con NRCS son inferiores a los reales y a los simulados con MEPI. En la *Figura 5* se representan los hidrogramas de escorrentía simulados por los modelos SIRMOD y MEPI en comparación con el medido en campo. Existe una enorme coincidencia entre la escorrentía simulada por MEPI y la producida en campo, sin duda debido a la efectividad en el manejo de dicho modelo. También existe una enorme coincidencia con los datos simulados por SIRMOD, si bien, en este modelo tan sólo es posible aplicar un recorte, el cual fue la mitad del caudal entrante.

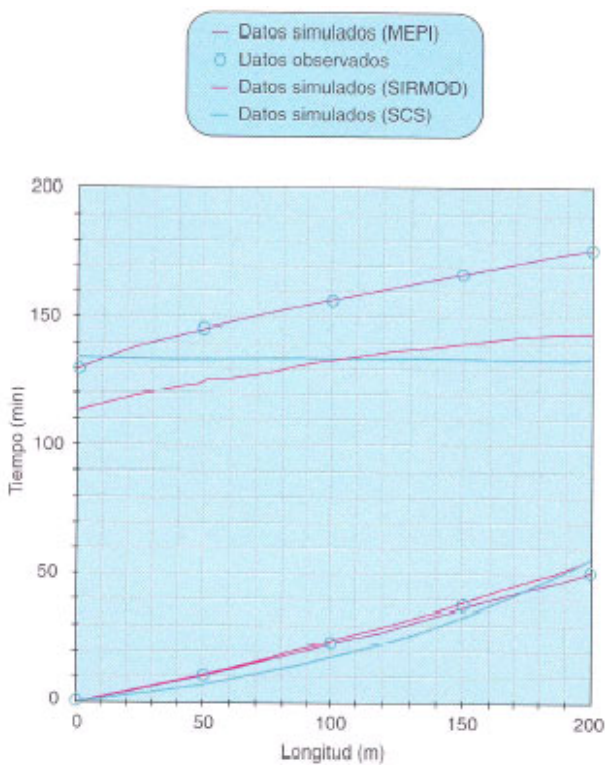


Figura 4. Curvas de avance y receso

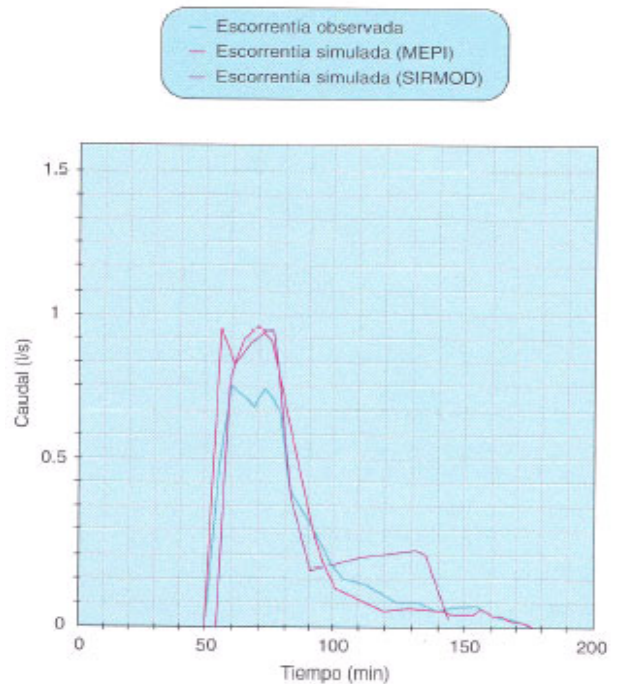


Figura 5. Comparación de hidrogramas de escorrentía

CONCLUSIONES

La aplicación del modelo MEPI durante varias campañas de riego supuso mejorar el manejo de los riegos y aumentar los rendimientos de aplicación.

La consideración del carácter variable de la infiltración explica en mayor medida lo que ocurre en campo. Esto unido a un sistema de decisión que maneje durante el mismo acontecimiento el riego, permite conseguir altos rendimientos de aplicación en campo.

Dicho manejo es aún más importante en condiciones como las de este riego, es decir, último riego de la campaña con un avance casi lineal debido a una reducida infiltración achacable a la costra superficial producida por los anteriores riegos.

El modelo MEPI permite manejar de forma fácil y simple el riego; con muy pocos datos se consiguen unos altos rendimientos de aplicación que no serían posibles con otros modelos de diseño y manejo.

BIBLIOGRAFÍA

- Azevedo, C.A. (1992) Real-Time Solution of the Inverse Furrow Advance Problem. Thesis Utah State University, Logan, Utah.
- Bautista, E. y W.W. Wallender (1991) Optimization of furrow infiltration parameters from advance times and advance rates ASCE National Conference, Honolulu, Hawaii.
- Blair, A.W. y E.T. Smerdon (1988) Infiltration from irrigation advance data. II: Experimental. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 114(IR1): 18-30.
- Camacho, E.; J. Roldán; M. Alcaide y J. Reca (1993) Parámetros de infiltración obtenidos de la curva de avance. XI Jornadas Técnicas sobre Riegos. Asociación Española de Riegos y Drenajes, pp. 19-25, Valladolid, España.
- Camacho, E.; I. Llanos; F. Casares; J. Roldán y M. Alcaide (1994) Control automatizado en tiempo real de un sistema de riego por surcos. XII Jornadas Técnicas sobre Riegos. Asociación Española de Riegos y Drenajes, pp. 511-515, Pamplona, España.
- Camacho, E.; C. Pérez; J. Roldán; M. Alcaide y J. Reca (1995) A control system of furrow irrigation in real time. Phys. Chem. Earth, 20(3-4):351-358.
- Camacho, E.; C. Pérez; J. Roldán; M. Alcaide y J. Reca (1996) Diseño y manejo del riego por surcos. XIV Congreso Nacional de Riegos. Asociación Española de Riegos y Drenajes, pp. 460-470, Aguadulce Almería, España.
- Camacho, E.; C. Pérez; J. Roldán y M. Alcaide (1997) IPE: Model for management and control of furrow irrigation in real time. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 123(IR4):264-269.
- Clemmens, A.J. (1983) Infiltration equations for border irrigation. Proc., Nat. Conf. on Adv. in Infiltration, Am. Soc. of Agric. Engrs., St. Joseph, Michigan, pp. 266.
- Christiansen, J.E., A.A. Bishop, F.W. Kiefer y Y.S. Fok (1966) Evaluation of intake rate constants as related to advance of water in surface irrigation. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs., 9(5), 671-674.
- De Tar, W.W. (1990) Infiltration function from furrow stream advance. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 115(4), 722-730.
- Elliott, R.L. y W.R. Walker (1980) Furrow irrigation infiltration and advance functions. ASAE Paper No. 80-2075, Am. Soc. of Agric. Engrs., St. Joseph, Michigan.
- Elliott, R.L. W.R. Walker y G.V. Skogerboe (1982) Zero-Inertia modeling of furrow irrigation advance. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 108(IR3), 179-195.
- Elliott, R.L. y D.E. Eisenhauer (1983) Volume balance techniques for measuring infiltration in surface irrigation. ASAE Paper No. 83-2520, Am. Soc. of Agric. Engrs., St. Joseph, Michigan.
- Fangmeier, D.D. y M.K. Ramsey (1978) Intake characteristics of irrigation furrows. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs., 21(4), 696-400.
- Izadi, B. y D.D. Heermann (1987) Real time estimation of infiltration parameters for controlling an irrigation. ASAE Paper No. 97-2113.
- Katapodes, N.D., J.H. Tang y A.J. Clemmens (1990) Estimation of surface irrigation parameters. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 116(5), 676-696.
- Kruse, E.G. y D.F. Heermann (1977) Implications of irrigation system efficiencies. Journal of Soil and Water Conservation, Vol. 32(6), 465-470.
- Ley, T.W. (1978). Sensitivity of Furrow Irrigation Performance to Field and Operation Variables. M.S. Thesis, Colorado State University, Fort Collins, Colorado. pp. 174.
- Marquardt, D.W. (1963) An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. Journal Soc. Indust. Appl. Math., 11(21), 431-441.
- Merriam, J.L. y J. Keller (1978) Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management. Utah State University, Logan, pp. 85.
- Nelder, J.A. y R. Mead (1965) A simplex method for function minimization. Computer Journal, 7(4), 308-313.
- Pérez, C. (1995) Control del riego por surcos en tiempo real. Trabajo Fin de Carrera, Universidad de Córdoba.
- Philip, J.R. (1957) Theory of infiltration. Soil Sci., 84(3):257-264.
- Press, W.H.; B.P. Flannery; S.A. Teukolsky y W.T. Vetterling (1989) Numerical recipes in Pascal. Cambridge University Press.
- Reddell, D.L. y E.A. Latimer (1986). Advance rate feedback irrigation system (ARFIS). ASAE Paper No. 86-2578.

- Reddell, D.L. y H.F. Latortue (1986) *Evaluation of furrow surface storage and the Kostikov infiltration parameters using irrigation advance data*. ASAE Paper No. 86-2874.
- Samani, Z.A. (1983) Infiltration under surge flow irrigation. PhD dissertation, Dept. of Agric, and Irrig. Engrg. Utah State Univ., Logan, Utah.
- Samani, Z.A., W.R. Walker, R.W. Jeppson y L.S. Willardson (1985) *Numerical solution for unsteady two-dimensional infiltration in irrigation furrows*. Trans. Am. Soc. Agric. Engrs., 28(4), 1189-1190.
- Scaloppi, E.J., G.P. Merkley y L.S. Willardson (1995) *Intake parameters from advance and wetting phases of surface irrigation*. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 121(1), 57-70.
- Schwankl, L.J. y W.W. Wallender (1988) *Zero-inertia furrow infiltration with variable infiltration and hydraulic characteristics*. Trans. Am.Soc.Agric. Engrs., 31(5). 1470-1475.
- Smith, D.L. y H.R. Duke (1984) *Prediction of irrigation advance rates in real time*. ASAE Paper No. 84-2590, Am. Soc. of Agric. Engr., St. Joseph, Michigan.
- Strelkoff, T. y F. Souza (1984) *Modeling effect of depth on furrow infiltration*. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 110(4), 375-387.
- USD A (1974) Border and furrow irrigation. Chapter 4 and 5, Section 15 (Irrigation). Soil Conservation Service National Engineering Handbook, Washington.
- USU (1989) SIRMOD. User's Guide. Irrigation Software Engineering Division, Department of Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University, Logan.
- Walker, W.R. y A.S. Humpherys (1983) *Kinematic-wave furrow irrigation model*. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE, 109(IR4), 377-392.
- Walker, W.R. y L.S. Willardson (1983) *Infiltration measurements for simulating furrow irrigation*. Proc. Nat. Conf. Adv. Inf., Am. Soc. ofAgr. Engrs., St. Joseph, Michigan, 241-248.
- Walker, W.R. y G.V. Skogerboe (1987) Surface Irrigation. Theory and Practice. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. pp. 386.
- Walker, W.R. y J.D. Busman (1990) Real-time estimation of furrow infiltration. J. Irrig. and Drain. Engrg., ASCE. 116(3), 299-318.