

# CALIBRACIÓN DE PARÁMETROS DE INFILTRACIÓN Y RUGOSIDAD CON UN MODELO NUMÉRICO PARA RIEGO CON SURCOS CERRADOS

Ernesto Vázquez Fernández y Jesús Gracia Sánchez<sup>1</sup>

**RESUMEN:** Se presenta la calibración de los parámetros que intervienen en las ecuaciones de infiltración de Green y Ampt y de rugosidad de Manning, a través del empleo de un modelo hidrodinámico completo en diferencias finitas para riego con surcos cerrados que resuelve las ecuaciones de Saint-Venant. Se muestran los resultados obtenidos en tres ensayos realizados en un surco cerrado de 50 m y, en un apéndice, el ajuste de la curva de avance en un surco cerrado de 150 m. Se concluye que el modelo numérico es aceptable para reproducir las tres fases del riego con surcos cerrados (avance, llenado y receso), por lo que puede ser empleado en el proceso de diseño para riego con surcos cerrados

## INTRODUCCIÓN

Uno de los métodos de riego más empleados en México es con surcos cerrados. Esto se debe a que permite alcanzar eficiencias de diseño elevadas, del orden del 90 % (Rendón et al, 1995). Sin embargo, la información existente para el diseño es escasa, refiriéndose principalmente a surcos abiertos. La modelación del riego por surcos se limita algunas veces a la etapa de avance (Elliot et al., 1982; Wallender y Rayej, 1990; Yu y Singh, 1990; Schmilz y Seus, 1992; Bautista y Wallender, 1992 y 1993; Juana y Losada, 1994). En este trabajo se presenta un modelo numérico para riego con surcos cerrados que permite determinar el gasto de diseño para obtener eficiencias del orden del 90 %, a través de la calibración previa de los parámetros de mayor incertidumbre, como son los de infiltración en la fórmula de Green y Ampt (Chu, 1978) y el coeficiente de rugosidad de Manning para la fórmula de fricción. Cabe hacer notar que los principales problemas en el diseño de surcos cerrados son una mala distribución longitudinal de las láminas de infiltración y un rebasamiento de los bordos; asimismo, los surcos cerrados deben emplearse en zonas donde el régimen de lluvias no produzca inundación de las parcelas.

Aquí se prefiere emplear la fórmula teórica de Green y Ampt para determinar la velocidad de infiltración vertical porque considera la humedad inicial del suelo, no obstante ser un parámetro menos influyente que la conductividad hidráulica y la diferencia de tensiones del suelo; empleándose el perímetro mojado del surco para obtener el gasto de infiltración vertical por unidad de longitud. El modelo numérico incluye un gasto base pequeño que proporciona las condiciones iniciales (tirantes y gastos) para el cálculo; este gasto base se man-

tiene constante durante toda la simulación numérica y se suma al gasto de diseño, lográndose reproducir en forma aproximada la curva de avance en la etapa inicial del riego (Sánchez y Fuentes, 1992). Además, se incluye un tramo ficticio donde no hay infiltración al final del surco que logra hacer más estable el cálculo en las etapas subsiguientes de llenado y receso. En todas las fases es necesario dejar escapar el gasto base pequeño, por lo que la condición de frontera no es tener un gasto nulo. Conviene insistir que estas hipótesis son sólo una herramienta de cálculo en el modelo numérico. El trabajo está dividido en los siguientes incisos: esquema numérico, calibración, conclusiones y un apéndice que reproduce la curva de avance del agua en un surco cerrado con longitud de 150 m, con el fin de mostrar que el modelo también es aplicable a surcos largos.

En el esquema numérico se presenta la solución de las ecuaciones de Saint-Venant con el método de diferencias finitas, y se incluyen las hipótesis y el procedimiento de cálculo. En la calibración se presentan los valores de los parámetros de la fórmula de Green y Ampt y del coeficiente de rugosidad de Manning que reproducen la etapa de avance, el tiempo de riego, el volumen infiltrado y la eficiencia de aplicación. Se concluye que el modelo numérico, no obstante las suposiciones del gasto base y el tramo ficticio al final del surco, reproducen en forma aceptable la curva de avance, el volumen de infiltración y la eficiencia de aplicación.

## MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico fue desarrollado originalmente para surcos abiertos, donde existen pérdidas por escurrimientos del agua al final del surco (coleos), para aplicar el método de corte posterior (Vázquez, 1994). La práctica

<sup>1</sup> Investigadores del Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) Ciudad Universitaria. Apdo. postal 70-472. Coyoacán 04510. México D.F. email: ernesvf@servidor.unam.mx

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol.5 Num.3 (septiembre 1998), páginas 11-16, recibido el 5 de septiembre de 1997 y aceptado para su publicación el 18 de mayo de 1998. 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.

del riego con surcos cerrados es muy común en México, por lo que aquí se presenta la adaptación a surcos cerrados que, al evitar los escurrimientos al final del surco permite, si el gasto es cercano al óptimo, alcanzar eficiencias altas.

**Ecuaciones de Saint-Venant**

Las ecuaciones completas de Saint-Venant (Wylie y Streeter, 1978) son la ecuación dinámica (ver lista de símbolos al final del texto):

$$(1-F^2) \frac{\partial y}{\partial x} + \frac{2Q}{gA^2} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + S_j - S = 0 \tag{1}$$

y la ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} + q = 0 \tag{2}$$

**Esquema en diferencias finitas y ecuación fundamental para los tramos intermedios**

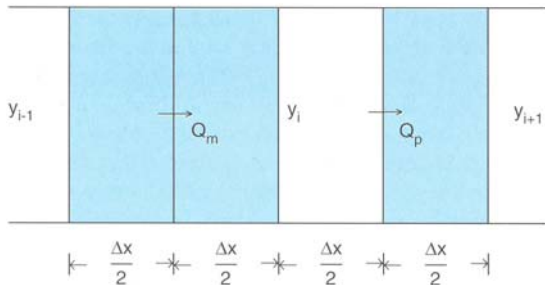


Figura 1. Esquema en diferencias finitas

Empleando un esquema centrado como el de la Figura 1, la ecuación dinámica puede expresarse en diferencias finitas como:

$$(1-F_m^j)^2 \frac{\tilde{y}_i^{j-1} - \tilde{y}_{i-1}^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_m^{j+1}}{g(A_m^j)^2} \frac{Q_i^j - Q_{i-1}^j}{\Delta x} + \tag{3}$$

$$+ \frac{1}{gA_m^j} \frac{Q_m^{j+1} - Q_m^j}{\Delta x} + \frac{n^2 |Q_m^j|}{(A_m^j)^2 (R_m^j)^{4/3}} Q_m^{j+1} = S$$

$$(1-F_p^i)^2 \frac{\tilde{y}_{i+1}^{j+1} - \tilde{y}_i^{j+1}}{\Delta x} + \frac{2Q_p^{j+1}}{g(A_p^j)^2} \frac{Q_{i+1}^j - Q_i^j}{\Delta x} + \tag{4}$$

$$+ \frac{1}{gA_p^j} \frac{Q_p^{j+1} - Q_p^j}{\Delta t} + \frac{n^2 |Q_p^j|}{(A_p^j)^2 (R_p^j)^{4/3}} Q_p^{j+1} = S$$

donde se usó la fórmula de Manning para calcular  $S_j$ . Los superíndices  $j$  identifican el instante de tiempo y los subíndices  $i$  la posición a lo largo del surco; además:

$$\tilde{y}_i^{j+1} = \theta y_i^{j+1} + (1-\theta) y_i^j$$

donde el factor de peso  $\theta$  pondera el tirante en el tiempo; según los resultados de las simulaciones numéricas, para cumplir con la ecuación de continuidad, la mejor aproximación se obtiene cuando  $\theta = 0.7$ .

Las áreas transversales y los radios hidráulicos en cualquier sección  $i$  se obtienen con las expresiones:

$$A_i = \sigma_i y_i^{\sigma^2} \quad y \quad R_i = \rho_i A_i^{\rho^2}$$

respectivamente.

La velocidad de infiltración del agua en el suelo, dada por la fórmula de Green y Ampt (Chu, 1978), multiplicada por el perímetro mojado, da el gasto de infiltración vertical por unidad de longitud. Si la ecuación de continuidad se expresa en diferencias finitas de acuerdo con el esquema adoptado y se agrega el gasto de infiltración, se tiene:

$$\frac{Q_p^{j+1} - Q_m^{j+1}}{\Delta t} + B_i^j \frac{y_i^{j+1} - y_i^j}{\Delta t} + P_i^j K \left( 1 + \frac{(\psi + y_i^j) \Delta W}{\zeta_i^j} \right) = 0 \tag{5}$$

El producto  $\psi \Delta W$  es identificado como el parámetro  $\lambda = \psi \Delta W$ , que se calibra más adelante. Además, para cualquier sección transversal  $i$ :

$$Q_i^{j+1} = \frac{Q_m^{j+1} - (1-\phi) Q_{i-1}^{j+1}}{\phi}$$

donde  $\phi$  es un factor de peso que pondera el gasto entre tirantes en un cierto instante; según los resultados de las simulaciones numéricas, la mejor aproximación, en el caso particular de este modelo, se obtiene cuando  $\phi = 0.75$  para cumplir con la ecuación de continuidad. De las ecuaciones 3 y 4 se obtiene:

$$Q_m^{j+1} = \frac{1}{C_m^j} \left[ S \Delta t + \frac{\Delta x Q_m^j}{g A_p^j \Delta t} + (1 - (F_p^j)^2) (\tilde{y}_{i-1}^{j+1} - \tilde{y}_i^{j+1}) \right] \tag{6}$$

y

$$Q_p^{j+1} = \frac{1}{C_p^j} \left[ S \Delta t + \frac{\Delta x Q_p^j}{g A_p^j} + (1 - (F_p^j)^2) (\tilde{y}_i^{j+1} - \tilde{y}_{i+1}^{j+1}) \right] \tag{7}$$

donde:

$$C_m^j = \frac{\Delta x}{g A_m^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_m^j|}{(A_m^j)^2 (R_m^j)^2} + \frac{2}{g (A_m^j)^2} (Q_i^j - Q_{i-1}^j) \tag{8}$$

y

$$C_p^j = \frac{\Delta x}{g A_p^j \Delta t} + \frac{n^2 \Delta x |Q_p^j|}{(A_p^j)^2 (R_p^j)^2} + \frac{2}{g (A_p^j)^2} (Q_{i+1}^j - Q_i^j) \tag{9}$$

son parámetros que dependen de la geometría de los surcos ( $A_m, A_p, R_m, R_p$ ) y de los gastos ( $Q_{i-1}, Q_i, Q_{i+1}, Q_m, Q_p$ ), calculados en el instante anterior, y de constantes definidas para todo el proceso de cálculo ( $S, n, g, \Delta x, \Delta t$ ).

La sustitución de las ecuaciones 6 y 7 en la ecuación 5 conduce a la ecuación fundamental para los tramos intermedios  $i$ :

$$\begin{aligned} & - \frac{(1 - (F_m^j)^2)}{C_m^j} \tilde{y}_{i-1}^{j+1} + \left[ \frac{(1 - (F_m^j)^2)}{C_m^j} + \frac{(1 - (F_p^j)^2)}{C_p^j} \right] \tilde{y}_i^{j+1} + \\ & + \left[ \frac{P_i^j \Delta x K}{y_i^j} \left( 1 + \frac{\lambda + y_i^j \Delta W}{\zeta_i^j} \right) + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} \right] y_i^{j+1} - \frac{(1 - (F_p^j)^2)}{C_p^j} \tilde{y}_{i+1}^{j+1} = \\ & = \frac{S \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A_m^j \Delta t} - \frac{S \Delta t}{C_p^j} - \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A_p^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta}{\Delta t} y_i^j \end{aligned} \tag{10}$$

donde el perímetro mojado  $p_i^j$  se multiplica por  $y_i^{j+1}/y_i^j$  con el fin de expresar  $y_i^{j+1}$  como factor en el tercer término, esto es, se linealiza la ecuación del perímetro mojado en el instante  $j+1$ .

Ecuación para el tramo aguas arriba

En la cabecera del surco ingresa el gasto  $Q_o$ , equivalente al gasto  $Q_m$  de la Figura 1, por tanto, la ecuación para el tramo aguas arriba es:

$$\frac{(1 - (F_p^j)^2)}{C_p^j} \tilde{y}_i^{j+1} + \left[ \frac{P_i^j \Delta x K}{y_i^j} \left( 1 + \frac{\lambda + y_i^j \Delta W}{\zeta_i^j} \right) + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} \right] y_i^{j+1} - \frac{(1 - (F_p^j)^2)}{C_p^j} \tilde{y}_i^{j+1} = Q_o - \frac{S \Delta x}{C_p^j} + \frac{\Delta x Q_p^j}{C_p^j g A_p^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \quad (11)$$

**Ecuación en el tramo aguas abajo**

Con el fin de facilitar el cálculo en la etapa de avance del frente de la onda de superficie y evitar problemas de inestabilidad en el último tramo, se adoptan las hipótesis de Sánchez y Fuentes (1992):

1. Se considera un gasto base pequeño (de 0.001 l/s a 0.01 l/s) que permite calcular las condiciones iniciales de los tirantes y gastos.
2. Se supone un tramo ficticio al final del surco donde no se calcula el gasto de infiltración.

Con estas hipótesis, el gasto de salida en el penúltimo tramo es igual al gasto base pequeño (aquí vale insistir en que el gasto base es sólo un artifice de cálculo); esto es equivalente a restar el gasto base del gasto de ingreso  $Q_o$  en todas las fases del riego (avance, llenado y rece-so), por lo que en surcos cerrados no hay gasto de salida real. Así, según la Figura 1, ahora  $Q_p = Q_b$  donde  $Q_b$  es el gasto base, y la ecuación queda

$$-\frac{(1 - (F_m^j)^2)}{C_m^j} \tilde{y}_{i-1}^{j+1} + \frac{(1 - (F_m^j)^2)}{C_m^j} \tilde{y}_i^{j+1} + \left[ \frac{P_i^j \Delta x K}{y_i^j} \left( 1 + \frac{\lambda + y_i^j \Delta W}{\zeta_i^j} \right) + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} \right] y_i^{j+1} = -Q_b + \frac{S \Delta x}{C_m^j} + \frac{\Delta x Q_m^j}{C_m^j g A_m^j \Delta t} + \frac{B_i^j \Delta x}{\Delta t} y_i^j \quad (12)$$

**Proceso de cálculo**

Con las condiciones iniciales calculadas para flujo permanente con el gasto base y de la condición inicial para la lámina acumulada de agua ( $\zeta_i = w$ ), se aplica la ecuación 10 en los tramos intermedios del surco, junto con las ecuaciones 11 y 12, y se establece un sistema de ecuaciones tridiagonal con incógnitas  $y_1, y_2, \dots, y_{n-1}$  que se resuelve por eliminación gaussiana. Enseguida, dentro del mismo intervalo de tiempo, se usan las ecuacio-

nes 6 y 7 para determinar los gastos  $Q_m$  y  $Q_p$ ; después, antes de infiltrarse la dosis requerida, se iguala el gasto en la cabecera con el gasto base (fin de la etapa de llenado y del tiempo de riego, e inicio de la fase de receso) para suspender el cálculo hasta que el tirante en el último tramo vuelve a ser el de las condiciones iniciales. En general, la lámina de infiltración mínima en un surco cerrado bien diseñado ocurre en un tramo cercano a la parte media del mismo.

Durante la etapa de avance sólo se calcula el gasto de infiltración en aquellos tramos donde  $Q_m > Q_p$  debido a que, por la hipótesis del gasto base, sólo habrá infiltración cuando el gasto en el frente sea mayor que el gasto base; para cumplir con esta condición, el gasto  $Q_m$  se multiplica por un factor igual a 10. La relación conveniente para  $\Delta x$  y  $\Delta t$  que evita la inestabilidad en el cálculo se establece en esta etapa, ya que la principal desventaja del modelo matemático es que a veces infiltra agua que toma del gasto base, lo que ocasiona tirantes negativos y la interrupción del cálculo. Dicha relación es  $\Delta t \leq 1.2 \Delta x$ , donde  $\Delta t$  está en segundos y  $\Delta x$  en metros. En las simulaciones numéricas para calibrar los parámetros que se describen en el siguiente inciso las longitudes de los tramos fueron  $\Delta x = 2.5$  m, el intervalo de tiempo  $\Delta t = 1$  s y el gasto base  $Q_b = 0.001$  l/s.

**CALIBRACIÓN**

En las instalaciones del laboratorio de hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México se construyó un dispositivo físico para alojar un surco con una longitud  $L = 50$  m, pendiente  $S = 0.1$  %, sección transversal triangular con taludes de  $60^\circ$  en ambos lados y una profundidad de 26 cm, de manera que el ancho del surco en la parte superior es  $D = 90$  cm. El suelo es arenoso y se tamizó por una malla de 5 mm antes de los ensayos, determinándose una conductividad hidráulica  $K = 0.061$  cm/min medida en un permeámetro. El porcentaje volumétrico a capacidad de campo fue de 24 %. El suelo se compactó con pisones metálicos antes de cada ensayo. El gasto de alimentación se midió con un vertedor triangular de  $30^\circ$  en el vértice y los ensayos se realizaron sin obstáculos a lo largo del surco.

En la *Tabla 1* se muestra la siguiente información:

- Humedad inicial del suelo ( $W_i$ ) en porcentaje volumétrico
- Gasto constante de alimentación ( $Q_o$ )
- Duración de la etapa de avance ( $ta$ )
- Tiempo de riego ( $Tr$ )
- Tiempo final ( $Tf$ ), incluyendo la etapa de receso, tirante máximo de agua al final del surco ( $y_m$ )
- Profundidad mínima del bulbo húmedo de agua ( $hr$ ) y profundidad promedio ( $hp$ ), ambas profundidades medidas 1.5 horas después del tiempo final,
- Eficiencia de aplicación ( $\eta$ ) calculada como la relación  $hr/hp$ , esto es, suponiendo que se satisface la dosis requerida por las raíces de las plantas.

Ensayo	Wi (%)	Q <sub>0</sub> (l/s)	ta (min)	Tr (min)	Tf (min)	y <sub>m</sub> (cm)	hr (cm)	hp (cm)	η (%)
1	9.0	0.6	18	67	90	8	34	36.3	94
2	9.0	1.8	5	26	75	11	36	38.7	93
3	9.2	3.0	3.5	21	78	16	39	45	87

Tabla 1. Mediciones en el modelo físico

En la *Tabla 2* se presenta la información de la dosis (*Z*) y la humedad inicial del suelo en lámina de agua (*w*), así como los valores de los parámetros de la fórmula de Green y Ampt (*K*, *λ*), y el coeficiente de rugosidad de Manning (*n*), obtenidos en la calibración mediante una búsqueda por tanteos hasta lograr una buena aproximación con la curva de avance del agua y las mediciones de la *Tabla 1*. Obsérvese, en la *Tabla 2*, que *K* conserva el valor de la medición efectuada en el permeámetro, y que tanto *K* como *n* se mantienen constantes en los tres ensayos. La dosis o lámina de infiltración mínima se calculó a partir de la fórmula de la eficiencia de aplicación como:

$$Z = \frac{\eta Q_0 Tr}{LD} \tag{13}$$

donde *L* = 50 m, *D* = 0.90 m, y los valores de *h*, *Q<sub>0</sub>* y *Tr* son los mismos de la *Tabla 1*.

La humedad inicial en lámina de agua se calculó con la relación lineal:

$$w = \frac{Wi Z}{(Wc - Wi)} \tag{14}$$

donde (*Wc - Wi*) = *ΔW* es la diferencia de humedades a capacidad de campo e inicial, y *Z* es la dosis calculada con la ecuación 13. Aquí se supone que después de 1.5 horas del ensayo, cuando se midieron las profundidades del bulbo húmedo para obtener *η*, y con ella *Z*, el suelo aún se mantenía a capacidad de campo y se conservaba la misma distribución de humedades a lo largo del surco.

Ensayo	Z (cm)	w (cm)	K (cm/min)	λ (cm)	n (s/m <sup>1/3</sup> )
1	5.0	3.0	0.061	35	0.05
2	5.8	3.5	0.061	68	0.05
3	7.4	4.7	0.061	105	0.05

Tabla 2. Parámetros de la calibración

Ensayo	Vz (m <sup>3</sup> )	Zm (cm)	Z (cm)	η (%)	y <sub>m</sub> (cm)	Tf (min)
1	2.4	5.0	4.6	92	7	114
2	2.8	6.3	5.8	93	11	83
3	3.8	8.5	7.4	87	14	84

Tabla 3. Resultados del modelo numérico

En la *Tabla 3* se presentan los resultados del modelo numérico para el volumen infiltrado (*Vz*), el promedio de las láminas de infiltración (*Zm*), la dosis (*Z*) y la eficiencia de aplicación (*η*). En las Figuras 2, 3 y 4 se muestran los ajustes de las curvas de avance.

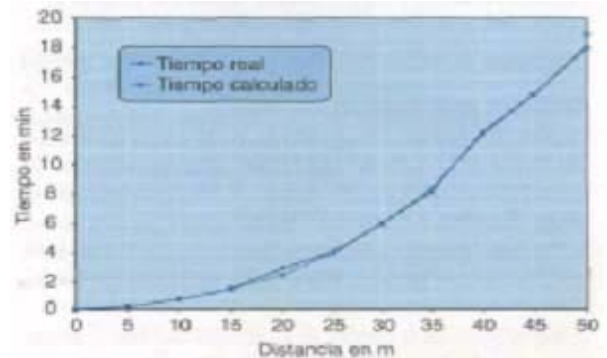


Figura 2. Curva de avance para el Ensayo 1

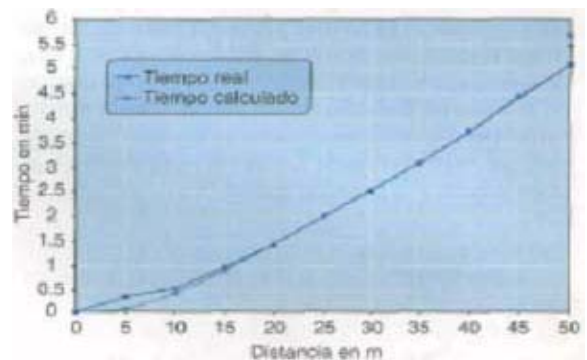


Figura 3. Curva de avance para el Ensayo 2

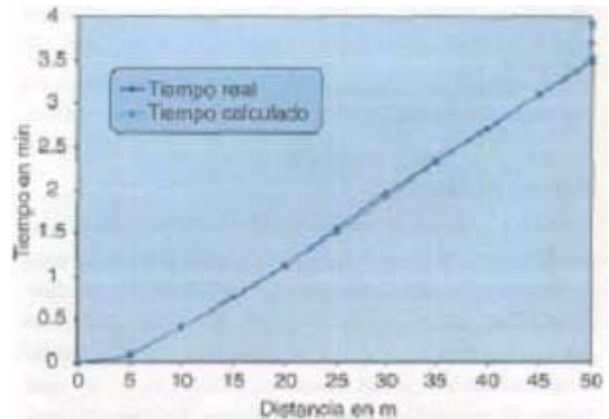


Figura 4. Curva de avance para el Ensayo 3

**CONCLUSIONES**

Dada la buena aproximación de los resultados del modelo numérico con las curvas medidas de avance del agua, así como la similitud con los volúmenes infiltrados, se considera que el modelo es aceptable para predecir las eficiencias de aplicación del riego continuo con surcos cerrados. La información requerida es la humedad inicial del suelo en lámina de agua, los parámetros de la fórmula de Green y Ampt, el coeficiente de rugosidad de Manning, la geometría de la sección transversal, la pendiente, la longitud del surco, la dosis requerida por la planta y el gasto de alimentación, que es la variable de diseño.

Los parámetros de la conductividad hidráulica del suelo y el coeficiente de rugosidad de Manning pueden ser calibrados en un primer riego, tal como se realizó en este trabajo, o calcularse a partir de pruebas con infiltrómetros, o estimarse de una manera simple, pero menos aproximada, con la textura del suelo. El parámetro que incluye la diferencia de tensiones del suelo cambia de un riego a otro y es el de mayor incertidumbre. El coeficiente de rugosidad de Manning también puede estimarse con la textura del suelo y los obstáculos que presente el surco para el escurrimiento.

Se puede pensar que la longitud tan corta del surco empleado en este trabajo haya inducido a que los resultados del modelo numérico sean favorables. Sin embargo, el modelo también ha sido empleado en surcos más largos, como puede verse en el Apéndice, donde se reproduce una curva de avance del agua medida en el campo en un surco de sección parabólica con 150 m de longitud. No obstante esto, es conveniente validar el modelo numérico en el campo con un mayor número de surcos bajo diferentes condiciones.

**APÉNDICE**

Datos obtenidos en uno de veinte surcos contiguos que se regaron de manera simultánea en una parcela con cultivo de ajo.

Con un gasto base  $Q_b = 0.01$  l/s, los parámetros de la fórmula de Green y Ampt y el coeficiente de rugosidad de Manning calibrados mediante tanteos con el modelo numérico son:

$$K = 0.04 \text{ cm/min}, \lambda = 10 \text{ cm} \text{ y } n = 0.15$$

Parámetros de diseño	Surco en cultivo de ajo
Longitud (m)	150.0
Pendiente (%)	0.18
Profundidad del surco (cm)	17.0
$\sigma_1$ (m <sup>2</sup> /m $\sigma^2$ )	0.913
$\sigma_2$	1.5
$P_1$ (m <sup>1M</sup> /m <sup>2</sup> p <sup>2</sup> )	0.43
$P_2$	0.555
Gasto (1/s)	1.2
Tiempo de riego (min)	120.0

Con toda la información anterior se calculó la curva de avance, cuyo ajuste con las mediciones efectuadas en el

campo se muestra en la Figura 5. Puede verse que el ajuste es aún mejor que los obtenidos para el surco corto de 50 m reportado en el artículo.

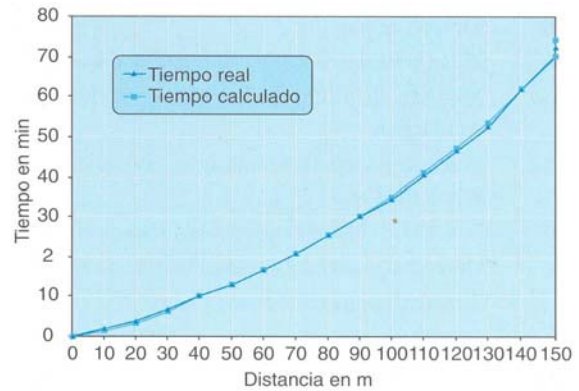


Figura 5. Curva de avance para un surco en parcela de ajo

**LISTA DE SÍMBOLOS**

- $A_m$  :Área de la sección transversal m
- $A_p$  :Área de la sección transversal p
- $B_i$  :Ancho de la superficie libre del agua en la sección i
- $C_m$  :Constante para calcular el gasto en la sección transversal m
- $C_p$  :Constante para calcular el gasto en la sección transversal p
- $D$  : Separación entre surcos
- $F_m$  :Número de Froude en la sección transversal m
- $F_p$  :Número de Froude en la sección transversal p
- $G$  :Aceleración de la gravedad
- $h_p$  :Profundidad de infiltración promedio medida an el modelo físico
- $h_r$  :Profundidad de infiltración mínima medida en el modelo físico, equivalente a la profundidad de infiltración requerida por la planta
- $I$  :Subíndice para identificar la posición de tirantes y gastos a lo largo del surco
- $j$  :Superíndice para identificar e/ tiempo
- $K$  :Conductividad hidráulica
- $L$  :Longitud del surco
- $n$  :Coeficiente de rugosidad de Manning
- $P_i$  :Perímetro mojado en la sección i
- $q_i$  :Gasto de infiltración por unidad de longitud en el tramo i
- $Q_b$  :Gasto base
- $Q_i$  :Gasto en la sección transversal i
- $Q_m$  :Gasto en la sección transversal m
- $Q_p$  :Gasto en la sección transversal p
- $Q_0$  :Gasto en la cabecera del surco
- $R_m$  :Radio hidráulico en la sección transversal m
- $R_p$  :Radio hidráulico en la sección transversal p

$S$	:Pendiente longitudinal del surco
$S_f$	:Pendiente hidráulica
$ta$	:Duración de la etapa de avance
$Tr$	:Tiempo de riego
$Tf$	:Tiempo final que incluye la etapa de recesión
$Vz$	:Volumen de infiltración calculado con el modelo numérico
$Wc$	:Porcentaje volumétrico de agua a capacidad de campo del suelo
$Wi$	:Porcentaje volumétrico inicial de agua en el suelo
$w$	:Humedad inicial del suelo en lámina de agua
$y_i$	:Tirante de agua en el tramo $i$
$\bar{y}_i$	:Tirante promedio (en el tiempo) en el tramo $i$
$y_m$	:Tirante máximo de agua medido al final del surco en el modelo físico
$Z$	:Dosis de diseño
$Z_m$	:Lámina de agua promedio calculada para el modelo físico
$\Delta t$	:Intervalo de tiempo
$\Delta x$	:Longitud del tramo $i$
$\Delta W$	: $Wc - Wi$ diferencia de humedades del suelo antes y después del riego
$\eta$	:Eficiencia de aplicación
$\theta$	:Factor de peso para ponderar los tirantes en el tiempo
$\lambda$	:Parámetro de la fórmula de Green y Ampt
$\rho_1$	:Coeficiente para calcular el radio hidráulico
$p_2$	:Exponente para calcular el radio hidráulico
$\sigma_1$	:Coeficiente para calcular el área de la sección transversal
$\sigma_2$	:Exponente para calcular el área de la sección transversal
$\phi$	:Factor de peso que ponderar los gastos en el espacio
$\psi$	:Tensión del suelo en el frente húmedo según la fórmula de Green y Ampt
$\zeta_i$	:Lámina acumulada de agua en el tramo $i$

## REFERENCIAS

- Bautista, E. y Wallender W. W. (1992) *Hydrodynamic Furrow Irrigation Model with Specified Space Steps*. J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, No. 3.
- Bautista, E. y Wallender W. W. (1993) *Reliability of Optimized Furrow-Infiltration Parameters*. J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 119, No. 5.
- Chu, S. T. (1978) *Infiltration During an Unsteady Rain*. Water Resources Research. Vol. 14, No. 3.
- Elliot, R. L., Walker W. R. y Skogerboe G. B. (1982) *Zero-Inertia Modeling of Furrow Irrigation Advance*. J. of the Irrigation and Drainage Division, ASCE, Vol. 108, No. IR3.
- Juana, L. y Losada A. (1994) *Semejanza Hidrodinámica en Riegos por Superficie*. Ingeniería del Agua, Vol. 1, No. 1, Universidad Politécnica de Valencia.
- Rendón, P. L, Fuentes R. C. y Magaña S. G. (1995) *Diseño Simplificado del Riego por Gravedad*. Memorias del VI Congreso Nacional de Irrigación, Chapingo, México.
- Sánchez, J. L. y Fuentes O. A. (1992) Posibilidades de Incrementar la Eficiencia del Riego por Surcos. Informe Interno del Instituto de Ingeniería, UNAM.
- Schmitz, G H. and Seus G. J. (1992) *Mathematical Zero-Inertia Modeling of Surface Irrigation: Advance in Furrows*. J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, No. 1.
- Vázquez, E. (1994) *Calibración de un Modelo Hidrodinámico para Riego por Surcos y Aplicaciones al Método de Corte Posterior*. Revista de Ingeniería, Vol. XIV, No. 4, UNAM.
- Wallender, W. W. y Rayej M. (1990) *Shooting Method for Saint-Venant Equations of Furrow Irrigation*. J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 1.
- Wylie, E. B. and Streeter V. L. (1978) Fluid Transients. McGraw-Hill.
- Yu, F. X. y Singh V. P. (1990) *Analytical Model for Furrow Irrigation*. J. of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 116, No. 2.