

GASTO ÓPTIMO EN RIEGO POR MELGAS EN PRESENCIA DE UN MANTO FREÁTICO SOMERO

• Heber Saucedo* •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

*Autor de correspondencia

• Manuel Zavala •

Universidad Autónoma de Zacatecas, México

• Carlos Fuentes •

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Resumen

El gasto óptimo de riego, es decir, aquel para el cual se obtiene la mayor eficiencia de uniformidad manteniendo valores elevados de las eficiencias de aplicación y de requerimiento de riego, se determina para el caso en que se tiene la presencia de un manto freático en el perfil de suelo en riego por melgas. El cálculo se efectúa haciendo uso de un modelo de simulación desarrollado por los autores de este trabajo, el cual hace posible describir las cuatro fases del riego por melgas, y tiene como base el acoplamiento numérico de las ecuaciones de Saint-Venant y la ecuación de Richards; las primeras describen el flujo del agua con una superficie libre que tiene lugar sobre el suelo y la segunda permite simular la transferencia de agua en el suelo. Se ha obtenido que no obstante la presencia de un manto freático en el perfil del suelo, la relación entre la longitud de la melga y el gasto óptimo es básicamente lineal, situación que se presenta en el caso de un perfil de suelo semi-infinito; en otras palabras, se deduce que la dependencia básicamente lineal que guardan la longitud de la melga y el gasto óptimo de riego es independiente de la condición inicial de distribución de las presiones en el suelo.

Palabras clave: riego por melgas, ecuaciones de Saint-Venant, ecuación de Richards.

Introducción

La descripción del flujo del agua en el riego por melgas requiere tener en cuenta la ecuación de Richards para describir el flujo del agua en el suelo y las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo del agua sobre la superficie del suelo, de tal forma que su acoplamiento permita conocer las formas de los perfiles de flujo superficial y la distribución de los potenciales de presión en el suelo según avanza el riego. El tirante proporcionado por las ecuaciones de Saint-Venant se utiliza para definir una condición de frontera tipo Dirichlet para la ecuación de Richards unidimensional, cuya solución numérica permite el cálculo de la lámina infiltrada necesaria para la solución de las

ecuaciones de Saint-Venant, teniéndose por lo tanto un procedimiento iterativo.

Saucedo *et al.* (2003) han analizado el efecto que tiene la posición inicial de un manto freático sobre la evolución del frente de avance en el riego por melgas, concluyendo que dicho efecto es mayor cuanto más cercana sea la posición inicial del manto freático en relación con la superficie del suelo. Una extensión natural de dicho análisis es calcular el efecto que tiene la posición inicial del manto freático no sólo en el frente de avance, sino en las cuatro fases que constituyen el riego por melgas y, en consecuencia, en la eficiencia del riego.

El objetivo del presente trabajo es utilizar el acoplamiento de las ecuaciones unidimensionales de Saint-Venant y Richards para calcular

el gasto óptimo de riego que debe aplicarse cuando se tiene la presencia de un manto freático somero en el perfil del suelo, es decir, según la posición inicial del manto freático y la lámina de riego por aplicar.

Flujo del agua sobre la superficie del suelo

El flujo del agua con una superficie libre es modelado con las ecuaciones de Saint-Venant, que resultan de la aplicación de las leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento. En una melga, la relación entre su ancho y el tirante de agua permite considerar las ecuaciones correspondientes al escurrimiento sobre una superficie de ancho infinito (Woolhiser, 1975). La ecuación de continuidad se escribe como:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q}{\partial x} + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

La ecuación de momentum se escribe en la forma recomendada por Saucedo *et al.* (2005):

$$\begin{aligned} \frac{1}{h} \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{2q}{h^2} \frac{\partial q}{\partial x} + \left(g - \frac{q^2}{h^3} \right) \frac{\partial h}{\partial x} + g(J - J_o) \\ + \beta \frac{q}{h^2} \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

donde $q(x,t) = U(x,t)h(x,t)$ es el gasto por unidad de ancho de melga [L^2T^{-1}]; x , la coordenada espacial en la dirección principal del movimiento del agua en la melga [L]; t , el tiempo [T]; U , la velocidad media; h , el tirante de agua [L]; J_o , la pendiente topográfica de la melga [LL^{-1}]; J , la pendiente de fricción [LL^{-1}]; $V_i = \partial I / \partial t$, el flujo de infiltración [LT^{-1}], es decir, el volumen de agua infiltrado en la unidad de tiempo por unidad de ancho y por unidad de longitud de la melga; I , la lámina infiltrada [L]; g , la aceleración gravitacional [LT^{-2}]; $\beta = 1 - \alpha$, el parámetro adimensional, siendo $\alpha = 1 - U_{ix} / U$, donde U_{ix} es la proyección en

la dirección del movimiento de la velocidad de salida de la masa de agua debido a la infiltración.

La relación entre las variables hidráulicas q y h con la pendiente de fricción, denominada ley de resistencia hidráulica, es adoptada de acuerdo con Fuentes *et al.* (2004), haciendo uso de una ley potencial de resistencia:

$$q = kv \left(\frac{h^3 g J}{v^2} \right)^d \quad (3)$$

donde v es el coeficiente de viscosidad cinemática del agua [L^2T^{-1}] y k es un factor adimensional; d es un parámetro adimensional, que varía entre $1/2 \leq d \leq 1$ en función del tipo de flujo; los valores extremos $d = 1/2$ y $d = 1$ corresponden, respectivamente, al régimen de Chézy y al flujo laminar de Poiseuille.

Para establecer las condiciones inicial y de frontera que deben sujetar a las ecuaciones de Saint-Venant para modelar el riego por melgas, se tiene en cuenta una melga cerrada, para evitar la pérdida de masa fuera del dominio de riego. Para la fase de avance se tiene:

$$q(x,0) = 0 \quad \text{y} \quad h(x,0) = 0 \quad (4)$$

$$q(0,t) = q_o, \quad q(x_f,t) = 0 \quad \text{y} \quad h(x_f,t) = 0 \quad (5)$$

donde $x_f(t)$ es la posición del frente de onda para el tiempo t y q_o es el gasto de aporte en la entrada de la melga. Para la fase de almacenamiento:

$$q(0,t) = q_o, \quad q(L,t) = 0 \quad (6)$$

donde L es la longitud de la melga y q_o es el gasto de aporte en la cabecera de la melga. Para la fase de consumo:

$$q(0,t) = 0, \quad q(L,t) = 0 \quad (7)$$

Para cerrar el sistema es necesario conocer la forma en que evoluciona en el tiempo la

lámina infiltrada en toda posición sobre la melga, es decir, la ley de infiltración, la cual es proporcionada con base en la solución de la ecuación de Richards (1931).

Flujo del agua en el suelo

La descripción del proceso de infiltración del agua en el suelo puede efectuarse teniendo como base la ecuación de Richards (1931), que resulta de la combinación de la ecuación de continuidad con el campo de velocidades calculado conforme a la ley de Darcy, y que en su forma tridimensional, sin tener en cuenta la extracción de agua por las plantas, se escribe como:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \nabla \cdot [K(\psi) \nabla \psi] - \frac{dK}{d\psi} \frac{\partial \psi}{\partial z} \quad (8)$$

donde ψ es el potencial de presión del agua en el suelo, expresado como la altura de una columna equivalente de agua [L] (positivo en la zona saturada y negativo en la zona no saturada del suelo); $C(\psi) = d\theta/d\psi$ es denominada la capacidad específica de humedad del suelo; $\theta = \theta(\psi)$ es el volumen de agua por unidad de volumen de suelo o contenido volumétrico de agua [L^3L^{-3}], y es una función de ψ conocida como curva característica de humedad o curva de retención del agua; $K = K(\psi)$ es la conductividad hidráulica [LT^{-1}], que en un suelo parcialmente saturado es una función del potencial de presión; el potencial gravitacional es asimilado a la coordenada espacial z , orientada positivamente hacia abajo [L]; $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z)$ es el operador gradiente; x , y son las otras dos coordenadas espaciales [L], y t es el tiempo [T].

El riego es un fenómeno que se efectúa en tres dimensiones, lo cual hace necesario que el flujo del agua en el suelo sea descrito utilizando la ecuación (8), sin embargo, es conveniente aceptar la hipótesis de que el fenómeno se

efectúa en planos paralelos al desarrollo de la melga, y entonces es posible utilizar la forma bidimensional de la ecuación de Richards:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (9)$$

Habida cuenta de los resultados de Saucedo et al. (2006) sobre el grado de aproximación de la hipótesis del tiempo de contacto en el riego por melgas, es posible simplificar más la aproximación, empleando la ecuación de Richards en su forma unidimensional:

$$C(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\psi) \left(\frac{\partial \psi}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (10)$$

que debe resolverse sobre el dominio de solución definido por una columna de suelo.

Como condición inicial para la solución de la ecuación de Richards unidimensional, se debe especificar la distribución de las presiones en el espacio; se considera una distribución hidrostática de las presiones, teniendo como referencia la posición del manto freático, es decir:

$$\psi = z - P, \quad 0 \leq z \leq Ec, \quad t > 0 \quad (11)$$

donde P es la profundidad del manto freático y Ec es el espesor de la columna de suelo.

En la superficie del suelo se impone una condición de frontera tipo Dirichlet, con el potencial de presión igual al tirante de agua calculado mediante las ecuaciones de Saint-Venant:

$$\psi = h, \quad z = 0, \quad t > 0 \quad (12)$$

La condición de frontera inferior se asigna como condición de Neumann con flujo nulo:

$$-K(\psi) \frac{\partial(\psi - z)}{\partial z} = 0, \quad z = Ec, \quad t > 0 \quad (13)$$

teniendo en cuenta que el espesor de la columna (E_c) debe ser mayor que la profundidad del manto freático.

La solución de la ecuación de Richards hace indispensable representar las propiedades hidrodinámicas del suelo, expresando el potencial de presión (ψ) como una función del contenido volumétrico de agua (θ) y la conductividad hidráulica K como una función de θ . Como es señalado por Fuentes *et al.* (1992), la combinación de las características hidrodinámicas de Fujita (1952) y Parlange *et al.* (1982), es conveniente en estudios teóricos, como la construcción de soluciones analíticas exactas, y en estudios experimentales, el uso de la combinación de la curva de retención propuesta por van Genuchten (1980), considerando la restricción de Burdine (1953) con la curva de conductividad hidráulica propuesta por Brooks y Corey (1964), debido a que satisfacen las propiedades integrales de la infiltración y a la facilidad para la identificación de sus parámetros.

La curva de retención propuesta por van Genuchten (1980) se escribe como $[\theta(\psi) - \theta_r] / [\theta_s - \theta_r] = [1 + (\psi / \psi_d)^n]^{-m}$, donde ψ_d es un valor característico de la presión del agua en el suelo; m y n son dos parámetros de forma empíricos, relacionados por la restricción de Burdine (1953): $m = 1 - 2/n$, con $0 < m < 1$, y $n > 2$, θ_s es el contenido volumétrico de agua a saturación efectiva del suelo y θ_r es el contenido volumétrico de agua residual. La conductividad hidráulica propuesta por Brooks y Corey (1964) se representa como $K(\theta) = K_s [(\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r)]^\eta$, donde η es un parámetro de forma empírico y positivo.

La lámina infiltrada se calcula para cada posición x_r donde se resuelven de forma numérica las ecuaciones de Saint-Venant: $I(x_i, t) = \int_0^F [\theta(x_i, z, t) - \theta(x_i, z, 0)] dz$, donde F es la posición del frente de humedecimiento y $\theta(x_r, z, 0)$ es el contenido volumétrico de agua inicial.

Solución numérica

Solución numérica de las ecuaciones de Saint-Venant

Para el cálculo del gasto óptimo se usa un esquema numérico para las cuatro fases del riego por melgas desarrollado por Saucedo (2003). La forma discreta de la ecuación de continuidad para la fase de avance se escribe como:

$$\begin{aligned} & [\omega q_\ell + (1 - \omega) q_j] \delta t - (x_\ell - x_j) [\omega (h_\ell + I_\ell) \\ & + (1 - \omega) (h_j + I_j)] \\ & - [\omega q_r + (1 - \omega) q_m] \delta t + (x_r - x_m) [\omega (h_r + I_r) \\ & + (1 - \omega) (h_m + I_m)] \\ & - [\phi h_\ell + (1 - \phi) h_r + \phi I_\ell + (1 - \phi) I_r] (x_r - x_\ell) \\ & + [\phi h_j + (1 - \phi) h_m + \phi I_j + (1 - \phi) I_m] (x_m - x_j) = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

para las fases de almacenamiento, consumo y recesión se escribe como:

$$\begin{aligned} & [\omega q_\ell + (1 - \omega) q_j] \delta t - [\omega q_r + (1 - \omega) q_m] \delta t \\ & - [\phi h_\ell + (1 - \phi) h_r + \phi I_\ell + (1 - \phi) I_r] (x_r - x_\ell) \\ & + [\phi h_j + (1 - \phi) h_m + \phi I_j + (1 - \phi) I_m] (x_m - x_j) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

La ecuación de momentum guarda la misma forma discreta para las cuatro fases del riego:

$$\begin{aligned} & 2\bar{q}\bar{h}(q_r - q_\ell)\delta t + (g\bar{h}^3 - \bar{q}^2)(h_r - h_\ell)\delta t \\ & + \bar{h}^2(x_r - x_\ell)[\omega q_r + (1 - \omega)q_\ell - \omega q_m - (1 - \omega)q_j] \\ & + g\delta t\bar{h}^3(x_r - x_\ell)[\omega J_r + (1 - \omega)J_\ell - J_o] \\ & + \beta\delta t\bar{q}\bar{h}(x_r - x_\ell)[\omega I_r + (1 - \omega)I_\ell - \omega I_m - (1 - \omega)I_j] = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

El cálculo de los coeficientes se realiza con base en los valores pertenecientes al nivel de

tiempo anterior: $\bar{q} = (1 - \phi)q_m + \phi q_r$, $\bar{h} = (1 - \phi)h_m + \phi h_j$ (Saucedo et al., 2005). Se introducen las variables pequeñas (Strelkoff y Katopodes, 1977): δh_r , δq_r , δh_ℓ y δq_ℓ , tales que, para las celdas interiores, se tiene: $h_\ell = h_j + \delta h_\ell$, $h_r = h_m + \delta h_r$, $q_\ell = q_j + \delta q_\ell$ y $q_r = q_m + \delta q_r$. Se sustituyen en las formas discretas de las ecuaciones de continuidad y momentum, y se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas, cuya solución permite avanzar en el tiempo los valores de las variables hidráulicas.

Solución numérica de la ecuación de Richards

La ecuación de Richards unidimensional (10) es discretizada en el espacio utilizando elementos finitos y en el tiempo mediante un esquema implícito en diferencias finitas. El procedimiento se encuentra bien documentado en la literatura y puede consultarse, por ejemplo, en Saucedo et al. (2002).

Aplicaciones

Caracterización hidrodinámica y discretización

El efecto de la presencia de un manto freático en el cálculo del gasto óptimo en el riego por melgas se ilustra para el caso de la zona de riego de La Chontalpa, Tabasco, México; se hace uso de la información reportada para un experimento realizado por Pacheco (1995): gasto total de aporte en la entrada $Q_o = 15 \text{ l/s}$; ancho de la melga $A = 10.5 \text{ m}$; gasto unitario de aporte en la entrada $q_o = 0.001428 \text{ m}^3/\text{s/m}$; longitud de la melga $L = 100 \text{ m}$; pendiente de la melga $J_o = 0.00085 \text{ cm/cm}$.

La caracterización hidrodinámica de la arcilla de La Chontalpa ha sido efectuada por Saucedo et al. (2003). Se tienen los valores siguientes para la característica de humedad de van Genuchten (1980): contenido volumétrico de agua residual $\theta_r = 0.0 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; contenido volumétrico de agua a saturación $\theta_s = 0.5245 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$; parámetro de forma $m = 0.066$. Para la ecuación de Brooks y Corey se tiene

el parámetro $\eta = 21.19$. Los dos parámetros restantes $\{\psi_d, K_s\}$ se estiman a fin de reproducir la curva de avance observada de modo experimental en una prueba de riego. Se ha utilizado un valor $\beta = 2$ del parámetro asociado con la extracción de momentum debida a la infiltración. El cálculo del número de Reynolds permite clasificar el régimen de flujo laminar, por lo cual se utiliza $d = 1$ como parámetro de la ley de resistencia.

La suma de los cuadrados de los errores entre la curva de avance calculada con el sistema acoplado de Saint-Venant y Richards, y la curva de avance observada es mínima con los valores $\psi_d = -15 \text{ cm}$ y $K_s = 1.86 \text{ cm/h}$. En la figura 1 se observa la buena concordancia entre las dos curvas de avance, $R^2 = 0.9984$, obtenida utilizando un coeficiente adimensional de la ley de resistencia $\kappa = 1/300$. El detalle del procedimiento se puede consultar en Saucedo et al. (2003).

Se ha utilizado un paso de tiempo constante $\delta t = 1.0 \text{ s}$ tanto para las ecuaciones de Saint-Venant como para la ecuación de Richards. Para la ecuación de Richards se utilizaron pasos de espacio mínimo y máximo: $\Delta z_{\text{mín}} = 0.02 \text{ cm}$ y $\Delta z_{\text{máx}} = 1.0 \text{ cm}$. La discretización utilizada guarda semejanza con las reportadas en la literatura (e.g., Katopodes y Strelkoff, 1977): $\delta t_{\text{mín}} = 5 \text{ s}$; Akanbi y Katopodes (1988): $\delta t_{\text{máx}} = 1 \text{ s}$, para las cuales se reportan resultados consistentes en las variables hidráulicas del riego. La discretización para la ecuación de Richards es más fina que la reportada por Saucedo et al. (2002), quienes comparan perfiles de humedad proporcionados por una solución analítica exacta con los obtenidos mediante una solución numérica para la ecuación de Richards, los valores del error relativo máximo para el caso de dos suelos contrastantes; una arcilla clara de Yolo, Estados Unidos, y una arena del río Isère, Francia, presentan una cota superior de 0.25% cuando se utiliza un paso de tiempo máximo $\delta t_{\text{máx}} = 30 \text{ s}$ y pasos de espacio mínimo y máximo $\Delta z_{\text{mín}} = 0.04 \text{ cm}$ y $\Delta z_{\text{máx}} = 10.0 \text{ cm}$. El suelo arcilla de la Chontalpa tiene un comportamiento hidrodinámico similar al

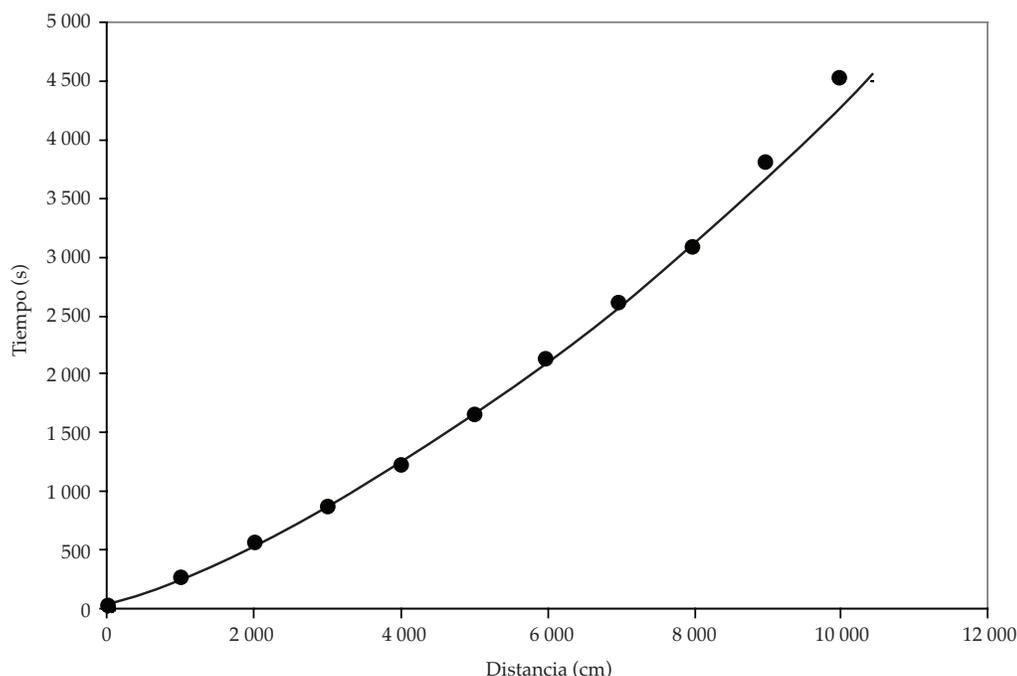


Figura 1. Calibración del modelo; $\psi_d = -15$ cm y $k_s = 1.86$ cm/h, $R^2 = 0.9984$.

de la arcilla clara de Yolo; en consecuencia, con la discretización utilizada, el error relativo máximo debe tener como una cota superior 0.25%.

Efecto de la presencia de un manto freático en riego por melgas

La representación de la presencia de un manto freático somero con la condición de frontera dada por la ecuación (13), hace que en todo punto ubicado sobre la melga solamente sea posible que se tenga una lámina infiltrada máxima, definida en relación con la diferencia que existe entre la distribución inicial del contenido volumétrico de agua en el suelo y un perfil de suelo saturado. Cuando se alcanza esta lámina máxima se presenta un aumento en la velocidad de la onda del flujo a superficie libre; según puede apreciarse en la figura 2, se ha tenido en cuenta el suelo arcilla de La Chontalpa, con una profundidad del manto freático de 100 cm.

Relación entre la longitud de la melga y el gasto óptimo

El acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards en el riego por melgas es utilizado con la finalidad de calcular el gasto óptimo de riego, es decir, aquel para el que se obtiene el mayor coeficiente de uniformidad, manteniendo valores aceptables de las eficiencias de aplicación y de requerimiento de riego, cuando se tiene la presencia de un manto freático en el perfil del suelo. La eficiencia de uniformidad ha sido evaluada utilizando el coeficiente de uniformidad de Christiansen (CUC): $CUC = 1 - (1/n\hat{I}) \sum_{i=1}^n |I_i - \hat{I}|$ donde I_i es la lámina infiltrada en el punto i [L]; \hat{I} es la lámina infiltrada media [L], y n es el número de puntos considerados para efectuar el cálculo.

En la figura 3 se muestra que la relación entre el gasto óptimo y la longitud de la melga para la cual es calculado dicho gasto es suficientemente bien descrita utilizando una

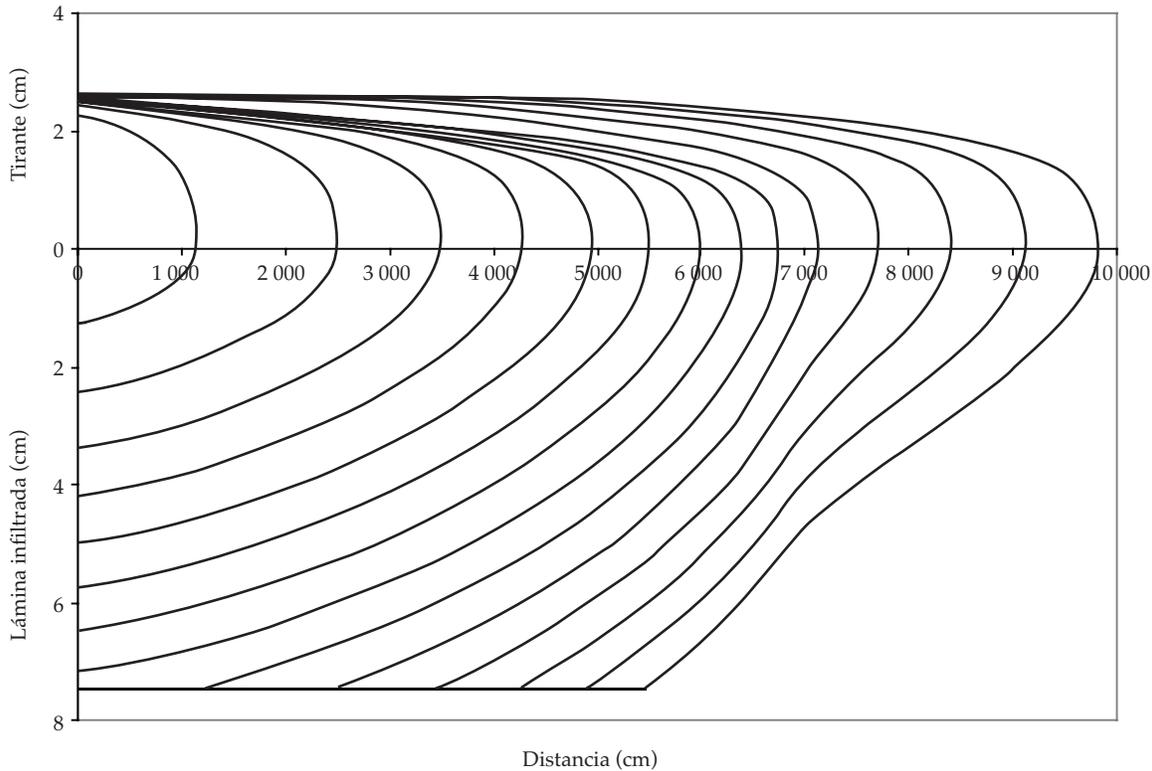


Figura 2. Efecto de la presencia de un manto freático somero en los perfiles de flujo de un riego por melgas. Perfiles de flujo cada diez minutos. Suelo arcilla de La Chontalpa; profundidad del manto freático, 100 cm.

correspondencia lineal; la figura se ha hecho teniendo en cuenta una lámina de riego de 10 cm, pero el comportamiento es similar, con independencia de la lámina de riego que se desea aplicar. El resultado es similar al obtenido para el caso en que no se presenta un manto freático en el perfil del suelo, lo cual indica que la dependencia básicamente lineal que guarda la longitud de la melga y el gasto óptimo de riego es independiente de la condición inicial de distribución de las presiones en el suelo. A manera de ejemplo, puede apreciarse en la figura 4 la distribución final de la lámina infiltrada para una lámina de riego de 10 cm y una profundidad de manto freático de 100 cm en el suelo arcilla de La Chontalpa, dicha profundidad ha sido usada para definir la distribución inicial de las presiones en el suelo conforme a la ecuación (11).

Cuadro de diseño del riego por melgas para un suelo arcilloso con presencia de manto freático

En el cuadro 1 se muestran los valores del gasto unitario; es decir, gasto que debe aplicarse por unidad de ancho y por unidad de longitud de la melga, correspondientes a diferentes láminas de riego y profundidades iniciales del manto freático, las casillas vacías indican que la cantidad de agua que se desea aplicar es mayor que la cantidad de agua que puede infiltrarse en el suelo. En el cuadro 2 se muestran los tiempos de riego correspondientes a los gastos unitarios mostrados en el cuadro 1. Las posiciones iniciales del nivel freático consideradas son 100, 150, 200 y 10 000 cm, y puede apreciarse que existe una tendencia creciente del gasto óptimo conforme se incrementa la profundidad

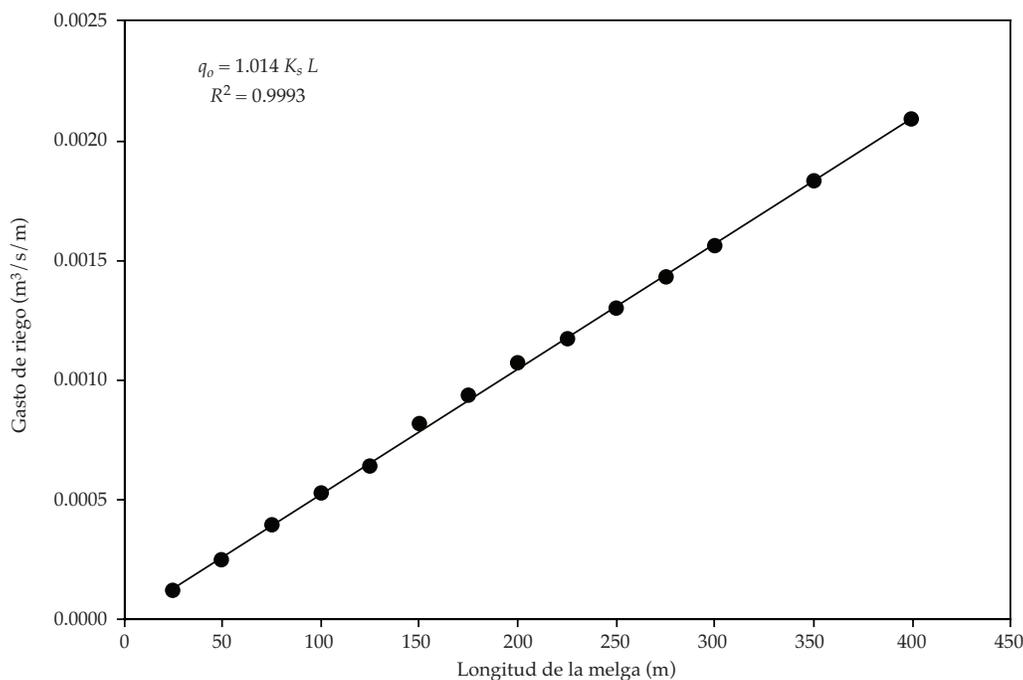


Figura 3. Relación entre la longitud de melga y el gasto de aporte óptimo para el suelo *arcilla de La Chontalpa* para una lámina de riego de 10 cm y una profundidad inicial del manto freático de 200 cm; K_s se expresa en m/s.

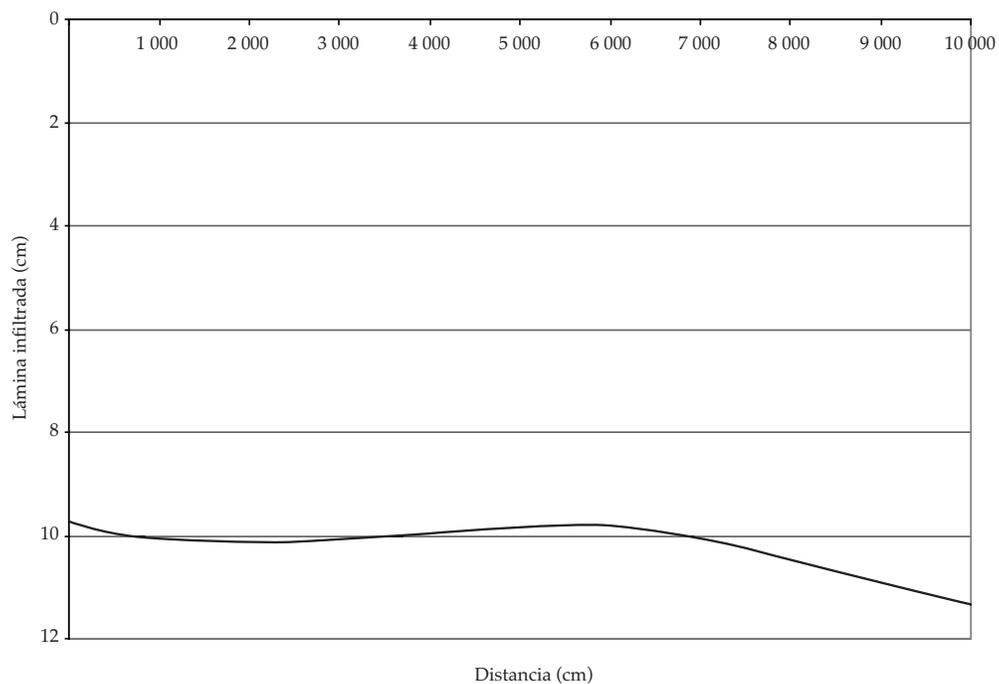


Figura 4. Distribución final de la lámina infiltrada en el suelo *arcilla de La Chontalpa*. Profundidad del manto freático, 100 cm; lámina de riego, 10 cm; CUC = 0.96.

Cuadro 1. Gasto de riego (l/s/m²) para la aplicación óptima de la lámina de riego.

PNF (cm)	Lr = 3	Lr = 5	Lr = 6	Lr = 8	Lr = 10	Lr = 12	Lr = 14
100	0.01162	0.01083	*	*	*	*	*
150	0.01455	0.01110	0.00896	0.00607	0.00441	*	*
200	0.01712	0.01141	0.00927	0.00688	0.00524	0.00445	0.00388
10 000	0.03236	0.01976	0.01554	0.01221	0.01001	0.00826	0.00775

Cuadro 2. Tiempo de riego (h) para la aplicación óptima de la lámina de riego.

PNF (cm)	Lr = 3	Lr = 5	Lr = 6	Lr = 8	Lr = 10	Lr = 12	Lr = 14
100	0.450	1.445	*	*	*	*	*
150	0.312	1.389	2.067	4.073	6.862	*	*
200	0.289	1.339	2.050	3.478	5.884	8.112	11.039
10 000	0.022	0.817	1.200	2.139	3.012	4.578	5.505

del manto freático. Debido a que las profundidades consideradas no se encuentran en la zona asintótica de la curva de retención de humedad, que se forma desde el manto freático hacia la superficie del suelo como consecuencia de la distribución de presiones hidrostática adoptada, no es posible alcanzar el previsible comportamiento asintótico del gasto óptimo de riego. No obstante lo anterior, los valores obtenidos pueden servir como guía para el manejo del agua en la zona productora de arroz de La Chontalpa, teniendo en cuenta las hipótesis básicas de que el suelo es homogéneo y que constituye un medio indeformable.

Conclusiones

El gasto óptimo de riego, es decir, aquel para el cual se obtiene la mayor eficiencia de uniformidad, manteniendo valores aceptables de las eficiencias de aplicación y de requerimiento de riego, se determina para el caso en que se tiene la presencia de un manto freático en el perfil de suelo en riego por melgas. El cálculo se efectúa haciendo uso de un modelo de simulación desarrollado por los autores, el cual hace posible describir las cuatro fases del riego por melgas, y tiene como base el acoplamiento numérico de las ecuaciones

de Saint-Venant y la ecuación de Richards; las primeras describen el flujo del agua con una superficie libre que tiene lugar sobre el suelo y la segunda permite simular la transferencia de agua en el suelo. Se ha obtenido que, no obstante la presencia de un manto freático en el perfil del suelo, la relación entre la longitud de la melga y el gasto óptimo es básicamente lineal, situación que se presenta en el caso de un perfil de suelo semi-infinito; en otras palabras, se deduce que la dependencia básicamente lineal que guardan la longitud de la melga y el gasto óptimo de riego es independiente de la condición inicial de distribución de las presiones en el suelo.

Recibido: 02/03/2010

Aceptado: 15/02/2013

Referencias

- AKANBI, A. and KATOPODES, N. Model for flow propagation on initially dry land. *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 114, No. 7, 1988, pp. 689-706.
- BROOKS, R.H. and COREY, A.T. *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Pap. 3. Fort Collins: Colorado State University, 1964.
- BURDINE, N.T. Relative permeability calculation from size distributions data. *Transactions AIME*. Vol. 198, 1953, pp. 171-199.

- FUENTES, C., HAVERKAMP, R., and PARLANGE, J.-Y. Parameter constraints on closed-form soil-water relationships. *Journal of Hydrology*. Vol. 134, 1992, pp. 117-142.
- FUENTES, C., DE LEÓN, B., SAUCEDO, H., PARLANGE, J.Y., and ANTONINO, A. Saint-Venant and Richards equations system in surface irrigation. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XVIII, No. 2, April-June, 2004, pp. 121-131.
- FUJITA, H. The exact pattern of a concentration-dependent diffusion in a semi-infinite medium, part I. *Textile Research Journal*. Vol. 22, 1952, pp. 757-761.
- KATOPODES, N. and STRELKOFF, T. Hydrodynamics of border irrigation, complete model. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. IR3:309-324.13188, 1977.
- PACHECO, P. *Comparación de los métodos de riego por surcos y por melgas y alternativas de diseño en el cultivo de arroz (Oryza sativa L.)*. Tesis de maestría en ciencias. México. D.F.: Colegio de Posgraduados en Ciencias Agrícolas, 1995.
- PARLANGE, J.-Y., BRADDOCK, R.D., LISLE, I., and SMITH, R.E. Three parameter infiltration equation. *Soil Sci*. Vol. 111, 1982, pp. 170-174.
- RICHARDS, L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*. Vol. 1, 1931, pp. 318-333.
- SAUCEDO, H., FUENTES, C., ZAVALA, M., and VAUCLIN, M. A finite element solution to the water transfer in an agricultural subsurface drainage system. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XVII, No. 1, January-March, 2002, pp. 93-105.
- SAUCEDO, H. *Acoplamiento de las ecuaciones de Saint-Venant y Richards en el riego por melgas*. Tesis de doctorado. México, D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, 2003, 97 pp.
- SAUCEDO, H., PACHECO, P., FUENTES, C., and ZAVALA, M. Effect of the water table position on the evolution of the advance curve in border irrigation. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XVIII, No. 4, October-December, 2003, pp. 119-126.
- SAUCEDO, H., FUENTES, C., and ZAVALA, M. The Saint-Venant and Richards equation system in surface irrigation: numerical coupling for the advance phase in border irrigation. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XX, No. 2, April-June, 2005, pp. 109-119.
- SAUCEDO, H., FUENTES, C., and ZAVALA, M. The Saint-Venant and Richards equation system in surface irrigation: 3. Numerical verification of contact time hypothesis in border irrigation. *Hydraulic Engineering in Mexico*. Vol. XXI, No. 4, October-December, 2006, pp. 135-143.
- STRELKOFF, T. and KATOPODES, N. Border-irrigation hydraulics with zero inertia. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*. IR3:325-342.13189, 1977.
- VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J*. Vol. 44, 1980, pp. 892-898.
- WOOLHISER, D.A. Simulation of unsteady overland flow. In: *Unsteady flow in open channels*. Vol. II. Mahmood, K. and Yevjevich, V. (editors). Fort Collins: Water Resources Publications, 1975, pp. 485-508.

Abstract

SAUCEDO, H., ZAVALA, M. & FUENTES, C. *Optimal flow for border irrigation with the presence of a shallow water table*. Water Technology and Sciences (in Spanish). Vol. IV, No. 5, November-December, 2013, pp. 99-109.

Optimal irrigation flow—i.e. the flow resulting in the greatest uniformity efficiency while maintaining acceptable application efficiency and irrigation requirement values—was determined for border irrigation with a water table in the soil profile. The calculation was performed using a simulation model developed by the authors of this work to describe the four border irrigation phases, and was based on the coupling of Saint-Venant and Richards equations. The former equation describes the flow of water with a free surface over the soil and the latter enables simulating the transfer of water into the soil. Regardless of the presence of a water table in the soil profile, the relationship between the border length and the optimal flow is basically linear, a situation which occurs when the soil profile is semi-infinite. That is, it is deduced that the basically linear dependence between the border length and optimal irrigation flow is independent of the initial distribution of the pressure in the soil.

Keywords: border irrigation, optimal irrigation flow, Richards equation, Saint-Venant equations, shallow water table.

Dirección institucional de los autores

Dr. Heber Saucedo

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Riego y Drenaje
Subcoordinador de Contaminación y Drenaje Agrícola
Paseo Cuauhnáhuac 8532, colonia Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono(s): +52 (777) 3293 659 y 3293 600, extensión 443
Fax: +52 (777) 3293 659
hsaucedo@tlaloc.imta.mx

Dr. Manuel Zavala

Universidad Autónoma de Zacatecas
Cristóbal de Oñate 110
98050 Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO
Teléfono: +52 (492) 1354 512
mzavala73@yahoo.com.mx

Dr. Carlos Fuentes

Universidad Autónoma de Querétaro
Cerro de las Campanas s/n, Las Campanas
76010 Santiago de Querétaro, Querétaro de Arteaga, MÉXICO
Teléfono y fax: +52 (442) 1921 200
cbfuentesr@gmail.com