



MODELACIÓN DE LA FASE DE AVANCE EN RIEGO POR MELGAS CON PRESENCIA DE UN MANTO FREÁTICO SOMERO

Sebastián Fuentes^{1*}; Carlos Chávez¹

¹Centro de Investigaciones del Agua, Departamento de Ingeniería de Riego y Drenaje, Universidad Autónoma de Querétaro. Cerro de las Campanas SN, Col. Las Campanas, C.P. 76010, Querétaro, México.

sebastian.fuentes@uaq.mx - 442 205 35 66 (*Autor de correspondencia)

Resumen

En los suelos agrícolas se cuenta con un contenido de humedad variable que depende principalmente de riegos precedentes y de la presencia de un manto freático somero. En este trabajo se modela la fase de avance del riego por melgas, haciendo uso del modelo hidrodinámico de las ecuaciones de Saint-Venant para el flujo superficial, mientras que para el flujo subsuperficial se utilizan la ecuación de Green y Ampt y una solución analítica de la infiltración en suelos con presencia de manto freático somero. Los resultados muestran que, para suelos donde el nivel freático se encuentre cercano a la superficie, es necesario el uso de una ecuación de infiltración que represente este fenómeno, para no perder representatividad en el proceso de modelación del riego por melgas. Además, se observa que cuando se alcanza la infiltración máxima, el suelo ya no es capaz de seguir aumentando el almacenamiento de agua.

Palabras claves: Modelo hidrodinámico, ecuaciones de Saint-Venant, solución analítica de la infiltración



Introducción

El riego por gravedad es el método más utilizado en todo el mundo (> 90%) para la aplicación de agua en las parcelas agrícolas (Akbari et al., 2018), sin embargo, las eficiencias de aplicación son menores al 50% que conduce bajos rendimientos (Hoogeveen et al., 2015; Unver et al., 2017). En este método, el agua se distribuye en todo el perfil del suelo, por lo que ha sido necesario desarrollar metodologías para el estudio de los procesos de infiltración y redistribución del agua (S. Fuentes et al., 2020).

El riego por melgas cuenta con tres fases visibles que ocurren durante todo el evento; la fase de avance, la fase de almacenamiento y la fase de recesión, que en conjunto se estudian con una variedad de modelos para entender el fenómeno (Chávez y Fuentes, 2019). De acuerdo con las ecuaciones de Saint-Venant, formadas por la ecuación de continuidad y la ecuación de momento, los modelos matemáticos para simular el riego superficial se clasifican principalmente en cuatro grupos (Ebrahimian y Liaghat, 2011): el modelo de equilibrio de volumen, el modelo de onda cinemática, el modelo de inercia cero y el modelo hidrodinámico.

La salinización progresiva de los suelos es uno de uno de los principales factores que afectan las parcelas en el riego por gravedad (S. Fuentes y Chávez, 2022), debido a un mal diseño del gasto de entrada en el riego por gravedad o de una mala caracterización de la parcela (Chávez y Fuentes, 2019). Alrededor del 20% de las parcelas de temporal y el 33% de las parcelas agrícolas de riego del mundo están afectadas por una alta salinidad (Liu et al., 2021). Los niveles del nivel freático desempeñan un papel esencial en la distribución de sales en el perfil del suelo y podrían controlarse mediante el drenaje subterráneo (Carvalho et al., 2021). Sin embargo, el drenaje incrementa el costo del riego, por lo cual se deben buscar estrategias que se ajusten a las características presentadas en el riego por melgas en los suelos con manto freático somero.

El objetivo de este trabajo es: a) modelar la fase de avance del riego por melgas en un suelo con un manto freático somero y b) comparar los resultados con dos ecuaciones de infiltración, de las cuales solo una toma en cuenta el manto freático somero.

Materiales y Métodos

El modelo hidrodinámico

El flujo de agua de riego por melgas se puede caracterizar con el modelo hidrodinámico completo de las ecuaciones unidimensionales de Barré de Saint-Venant, que describen con precisión el riego por melgas (Dong et al., 2018). En una melga la relación entre el 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 es la siguiente:

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

la ecuación de cantidad de movimiento utilizada es la recomendada por Saucedo et al. (2005):

$$h^2 \frac{\partial q}{\partial t} + 2hq \frac{\partial q}{\partial x} + (gh^3 - q^2) \frac{\partial h}{\partial x} + gh^3 (J - J_0) + \beta qh \frac{\partial l}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

donde $q(x,t) = U(x,t)h(x,t)$ es el gasto por unidad de ancho de melga o gasto unitario, x es la dirección principal del movimiento del agua en la superficie, t es el tiempo, U es la velocidad media en una sección transversal, h es el tirante de agua, $V_i = \partial l(x,t)/\partial t$ es la velocidad de infiltración, es decir el volumen de agua infiltrado en la unidad de tiempo por unidad de ancho y por unidad de longitud de la melga, l es la lámina infiltrada, g es la aceleración gravitacional, $\beta = U_x/U$ es un parámetro adimensional, donde U_x es la proyección en la dirección del movimiento de la velocidad de salida de la masa de agua debido a la infiltración, J_0 es la pendiente topográfica de la superficie del suelo cuando el ángulo de inclinación es pequeño, y J es la pendiente de fricción que puede ser determinada por la ley fractal de resistencia hidráulica C . Fuentes et al. (2004):

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

donde v es el coeficiente de viscosidad cinemática, k es un factor adimensional que incluye los efectos de la rugosidad de la superficie del suelo y el exponente d tiene una interpretación fractal, de esta ley se deduce la de Chezy haciendo $d = 1/2$ y la de Poiseuille con $d = 1$.

Se usa la ecuación de Green y Ampt (1911) para el flujo subsuperficial:

$$V_i = \frac{\partial l}{\partial t} = K_s \left(1 + \frac{h + h_f}{z_f} \right), \quad z_f = l(t)/\Delta\theta \quad (4)$$

donde $\Delta\theta = \theta_s - \theta_0$ es la diferencia entre el contenido de humedad a saturación y la humedad inicial, l es el volumen de infiltración acumulada por unidad de área de suelo o lámina infiltrada, K_s es la conductividad hidráulica a saturación, h es el tirante de agua y h_f es la presión de succión en el frente de humedecimiento (z_f).

Para describir la infiltración en suelos con un manto freático somero, C. Fuentes et al. (2010) desarrollaron una solución analítica de la ecuación de Richards utilizando las hipótesis de Green y Ampt:

$$V_i = \frac{\partial l}{\partial t} = K_s \left[1 + \frac{h + h_f (1 - z_f/P_f)}{z_f} \right], \quad z_f = P_f \left(1 - \sqrt{1 - l(t)/l_M} \right) \quad (5)$$

donde P_f es la profundidad del manto freático y $I_M = 1/2\Delta\theta P_f$ es la infiltración máxima.

La solución de las ecuaciones (1) y (2) de Saint-Venant para el flujo superficial, se realizó mediante un esquema de lagrangiano en diferencias finitas, mientras que en el flujo subsuperficial se utilizaron las ecuaciones (4) y (5) que fueron resueltas por el método de Newton-Raphson y el método de bisección respectivamente (S. Fuentes et al., 2022; S. Fuentes y Chávez, 2022).

Resultados y Discusión

Caracterización del suelo

La modelación se realizó con la información reportada por Pacheco (1994) para un suelo arcilloso con un manto freático somero de la Chontalpa, Tabasco, México. Los datos medidos en las pruebas de riego fueron: ancho de la melga $B = 10.5$ m, longitud de la melga $L = 100$ m, pendiente de la melga $J_o = 0.00085$ m/m, contenido volumétrico de humedad a saturación $\theta_s = 0.5245$ cm³/cm³, el parámetro adimensional asociado con la extracción de cantidad de movimiento debido a la infiltración $\beta = 0$. En la ley de resistencia hidráulica, ecuación (3), se utilizó $d = 1$. El gasto unitario de aporte en la entrada fue de $q_o = 0.001428$ m³/s/m, $P_f = 50$ cm, $I_M = 2.15$ cm, humedad inicial $\theta_o = 0.4386$ cm³/cm³, tirante medio $\bar{h} = 2.73$ cm y a partir del tirante medio se calculó $k = 4.292 \times 10^{-5}$. Los valores de $K_s = 1.5325$ cm/h y $h_f = 44.00$ cm fueron optimizados mediante el algoritmo de optimización de Levenberg-Marquardt (Moré, 1978), haciendo uso de la ecuación (5) en la infiltración (S. Fuentes y Chávez, 2022).

Comparación de ecuaciones de infiltración

En la Figura 1 se presenta la evolución de la lámina infiltrada, calculada con las ecuaciones (4) y (5), donde se percibe que después de los 27.7 min de iniciado el riego, el suelo llega a su punto máximo de infiltración. Una vez que el suelo llega a ese punto, ya no es capaz de almacenar más agua, por lo tanto, se considera un suelo completamente saturado.

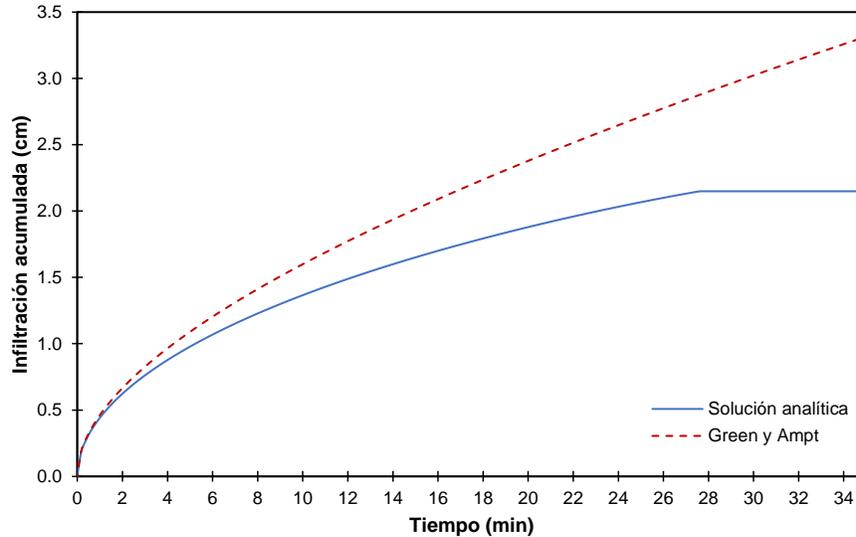


Figura 1. Evolución de la lámina infiltrada en un riego por melgas con manto freático somero.

Los perfiles de avance y lámina infiltrada se muestran en la figura 2, donde se puede observar que, para la solución analítica, la lámina infiltrada está limitada sobre todo punto de la melga por la infiltración máxima calculada (2.15 cm). Esto se comprueba a partir de la segunda curva (38 min), en la que cierta región del suelo ya alcanzó el punto de saturación. Además, se comparan los perfiles de tirante e infiltración con la ecuación de Green y Ampt, en donde se observa que con la ecuación de Green y Ampt, el frente del perfil de avance se vuelve cada vez más lento, comparado con la solución analítica, esto debido a que el manto freático somero modifica la velocidad de este frente y limita la infiltración máxima que puede alcanzar. El tirante normal utilizado es $h_0 = 4.095$ cm, el cual es similar en ambos modelos.

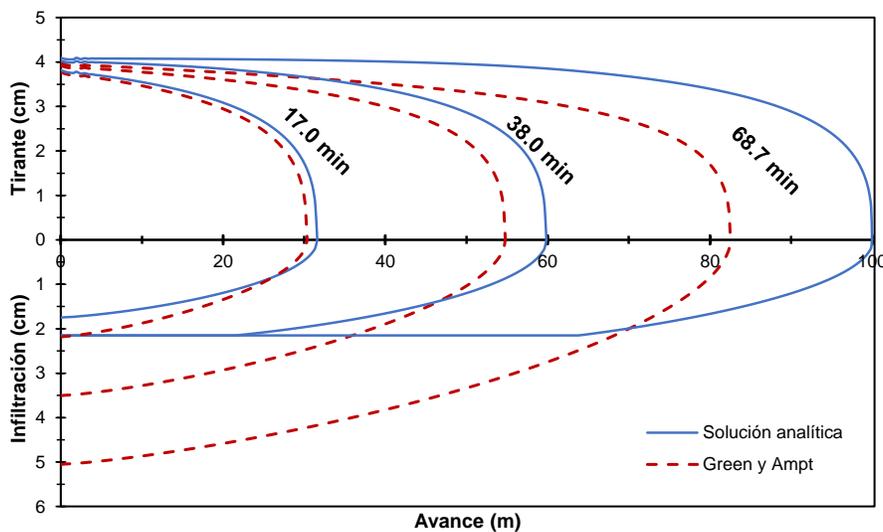


Figura 2. Variación de los perfiles de flujo superficial y subsuperficial en diferentes tiempos.

Cuando el frente de avance de ambas funciones de infiltración alcanza la parte final de la melga, los perfiles de infiltración son completamente diferentes (figura 3), debido a que con la ecuación de Green y Ampt se representa un perfil de humedad constante a lo largo de una columna de suelo y esto no representa un manto freático somero, ya que la condición inicial de humedad depende la profundidad $\theta_i(z)$, de modo que $\theta_i(0) = \theta_o$ y $\theta_i(P_f) = \theta_s$ (C. Fuentes et al., 2010). También se observa que los frentes de onda llegan al final de la melga en momentos diferentes, causados por la variación de la humedad del suelo, debido al manto freático somero, que modifica la velocidad de avance. La lámina de riego en la entrada de la melga para Green y Ampt fue de 6.10 cm, mientras que en la solución analítica se cuenta con el valor de la infiltración máxima (2.15 cm).

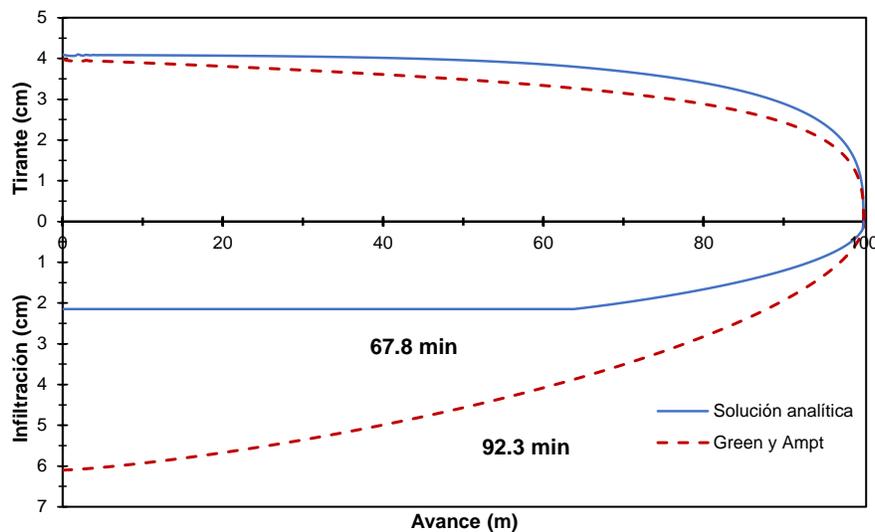


Figura 3. Variación del tirante e infiltración al final de la melga.

Conclusiones

A partir de las ecuaciones de Saint-Venant y el acoplamiento numérico de la solución analítica de la infiltración para un suelo con manto freático somero, se demostró que, para un suelo con sobre elevación del nivel freático, es posible modelar el riego por melgas y analizar el efecto del manto en el proceso de infiltración, relacionado con la lámina máxima que puede almacenar el suelo. Además, con estas características del suelo es posible establecer el cultivo más idóneo y que se adapte mejor a las condiciones del medio poroso.

También se utilizó la ecuación de Green y Ampt en la infiltración, para comparar los resultados obtenidos con ambas ecuaciones, donde se demostró que al utilizar una ecuación que no representa las condiciones del suelo con un manto freático somero, las láminas y los tiempos de riego son mayores lo cual provoca una inadecuada



modelación del riego por melgas que origina déficits o excesos de agua requeridos por el cultivo establecido.

Finalmente, ambas ecuaciones de infiltración aquí utilizadas requieren de pocos parámetros característicos del suelo (K_s y h_f) que se obtienen a partir de la solución del problema inverso, debido a su difícil acceso en campo, con datos de una prueba de riego y los parámetros característicos del suelo.

Referencias Bibliográficas

Akbari, M., Gheysari, M., Mostafazadeh-Fard, B., y Shayannejad, M. (2018). Surface irrigation simulation-optimization model based on meta-heuristic algorithms. *Agricultural Water Management*, 201, 46–57.

Carvalho, A. A. de, Montenegro, A. A. de A., de Lima, J. L. M. P., Silva, T. G. F. da, Pedrosa, E. M. R., y Almeida, T. A. B. (2021). Coupling Water Resources and Agricultural Practices for Sorghum in a Semiarid Environment. *Water*, 13(16), 2288.

Chávez, C., y Fuentes, C. (2019). Design and evaluation of surface irrigation systems applying an analytical formula in the irrigation district 085, La Begoña, Mexico. *Agricultural Water Management*, 221, 279–285.

Dong, Q., Zhang, S., Bai, M., Xu, D., y Feng, H. (2018). Modeling the Effects of Spatial Variability of Irrigation Parameters on Border Irrigation Performance at a Field Scale. *Water*, 10(12), 1770.

Ebrahimian, H., y Liaghat, A. (2011). Field evaluation of various mathematical models for furrow and border irrigation systems. *Soil and Water Research*, 6(No. 2), Art. No. 2.

Fuentes, C., Chávez, C., y Zataráin, F. (2010). An analytical solution for infiltration in soils with a shallow water table: Application to gravity irrigation. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 1(3), 39–49.

Fuentes, C., de León, B., Parlange, J.-Y., y Antonino, A. C. D. (2004). Saint-Venant and Richards equations system in surface irrigation: (1) Hydraulic resistance power law. *Ingeniería Hidráulica en México*, 19, 65–75.

Fuentes, S., y Chávez, C. (2022). Modeling of Border Irrigation in Soils with the Presence of a Shallow Water Table. I: The Advance Phase. *Agriculture*, 12(3), 426.

Fuentes, S., Fuentes, C., Saucedo, H., y Chávez, C. (2022). Border Irrigation Modeling with the Barré de Saint-Venant and Green and Ampt Equations. *Mathematics*,



10(7), 1039.

Fuentes, S., Trejo-Alonso, J., Quevedo, A., Fuentes, C., y Chávez, C. (2020). Modeling Soil Water Redistribution under Gravity Irrigation with the Richards Equation. *Mathematics*, 8(9), 1581.

Green, W. H., y Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics I: The flow of air and water through soils. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), Art. 1.

Hoogeveen, J., Faures, J. M., Peiser, L., Burke, J., y van de Giesen, N. (2015). GlobWat – a global water balance model to assess water use in irrigated agriculture. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9), 3829–3844.

Liu, C., Cui, B., Zeleke, K. T., Hu, C., Wu, H., Cui, E., Huang, P., y Gao, F. (2021). Risk of Secondary Soil Salinization under Mixed Irrigation Using Brackish Water and Reclaimed Water. *Agronomy*, 11(10), 2039.

Moré, J. J. (1978). The Levenberg-Marquardt algorithm: Implementation and theory. En *Numerical Analysis* (pp. 105–116). Springer.

Pacheco, P. (1994). *Comparación de los métodos de riego por surcos y por melgas y alternativas de diseño en el cultivo del arroz (Oryza Sativa L.)* [M.Sc. Thesis]. Centro de Hidrociencias, Colegio de Postgraduados.

Saucedo, H., Fuentes, C., y Zavala, M. (2005). The Saint-Venant and Richards equation system in surface irrigation: (2) Numerical coupling for the advance phase in border irrigation. *Ingeniería Hidráulica en México*, 20(2), Art. 2.

Unver, O., Bhaduri, A., y Hoogeveen, J. (2017). Water-use efficiency and productivity improvements towards a sustainable pathway for meeting future water demand. *Water Security*, 1, 21–27.

Woolhiser, D. A. (1975). Simulation of unsteady overland flow. En K. Mahmood y V. Yevjevich, *Unsteady flow in open channels* (Vol. 2, pp. 485–508). Water Resources Publications.