

Modelo empírico del patrón de humedad en un suelo orgánico de México con riego por goteo superficial

Jorge Víctor Prado Hernández^{a,e}, Magali Ismene González Rivas^{b,e}, Aleida Mota Lezama^{b,e}, Mauricio Carrillo García^{c,e}, Mario Alberto Vázquez Peña^{c,e}, Homero Lugo Valenzuela^{d,e} y Óscar Gerardo Valentín Paz^{c,e}

^a Profesor-Investigador, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo (vpradohdez@gmail.com, ac12493@chapingo.mx)

^b Ingeniero. Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. (magali.ismene@gmail.com, aleidamotalz@gmail.com)

^c Profesor-Investigador, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo (mauricio@correo.chapingo.mx, mavp52@hotmail.com)

^d Estudiante de doctorado, Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (hiv_300@hotmail.com)

^e Carretera México-Texcoco, km 38.5, Chapingo, Texcoco, Estado de México. C.P. 56230, México.

Línea temática B | Hidrología, usos y gestión del agua.

RESUMEN

Con la finalidad de contar con información de apoyo para mejorar el diseño y la operación de un riego por goteo superficial, escasa en México, esta investigación abordó el estudio y la representación matemática del patrón de humedecimiento en un suelo agrícola con tres contenidos de materia orgánica y goteros de dos caudales. El experimento se realizó en contenedores de plástico en un sitio cerrado, midiendo la geometría y la distribución del contenido de humedad del bulbo de mojado en diferentes tiempos de aplicación del riego. Se obtuvieron ecuaciones empíricas no lineales para estimar la profundidad en el centro (z) y el diámetro (d) del bulbo húmedo a través del tiempo, cuyos parámetros estadísticos de bondad de ajuste resultaron mejores que el de los modelos de otros autores, y se observó que un incremento de la materia orgánica en el suelo genera una geometría del bulbo húmedo más esférica y un contenido de humedad más uniforme.

Palabras clave | Patrón de humedecimiento; bulbo húmedo; riego por goteo; modelación del riego; diseño de riego; el agua en el suelo.

INTRODUCCIÓN

Por lo general cuando se diseña un riego por goteo en México no se toma en cuenta el bulbo de humedad y muchas veces se considera que el diámetro de mojado es igual al marco de plantación. Esto es debido a que no se conoce con precisión el patrón de mojado de los goteros con distintos caudales y tiempos de riego, en diferentes tipos de suelo. Si bien, hay poca información sobre los patrones de mojado en suelos comunes, es aún más incierto en suelos orgánicos, lo que en la actualidad está cobrando importancia por los beneficios a los cultivos obtenidos y a los consumidores.

El conocimiento del movimiento del agua en el suelo (frente de humedecimiento) puede ofrecer mejores bases para proyectar el riego y para planear las prácticas de riego a nivel parcelario. Para lograrlo, es importante que diseñadores de los sistemas de riego puedan predecir, cuando menos de forma aproximada, las dimensiones del bulbo húmedo generado dentro del sistema radicular del cultivo.

Según Golberg *et al* (1997), la forma y distribución del bulbo de humedecimiento es complejo debido a que intervienen las características físicas del suelo y las de operación de los sistemas de riego (Schwartzman y Zur, 1986; Pizarro, 1996; Amin y Ekhmaj, 2006; Keyvan y Troy, 2011). Su estudio se ha abordado con diferentes estrategias: con métodos analíticos, métodos simplificados de forma numérica, métodos empíricos y semiempíricos, y a través de pruebas experimentales (Ben-Asher *et al.*, 1986; Ledesma, 1995; Estrada, 1995). En cualquiera de las estrategias no experimentales adoptadas es indispensable verificar su validez mediante estudios en campo para integrar los múltiples factores que intervienen en el movimiento del agua.

Por lo anterior, en esta investigación se planteó un estudio experimental para analizar el bulbo de humedecimiento en un suelo franco arcillo arenoso con tres contenidos de materia orgánica en riego por goteo superficial con emisores de dos caudales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Tratamientos de suelo estudiados

El estudio se hizo en un suelo de textura franco areno arcillosa (arena=57.5%, arcilla=20.5% y limo=22.0%), según la clasificación del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), al que se le agregó materia orgánica (MO) proveniente de residuos de cosecha de maíz, resultando un suelo testigo con un 1.75% de MO en su estado natural (tratamiento T1) y dos tratamientos más (T2 y T3), con 2.69 y 2.82 % de MO, respectivamente. Las diferencias en los contenidos de MO modificaron notablemente la densidad aparente (D_a) y la conductividad hidráulica a saturación (K_s) (Tabla 1).

Los métodos empleados para determinar la textura, densidad aparente, contenido de MO, conductividad hidráulica a saturación, capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), fueron respectivamente: sedimentación, terrón y parafina, Walkley y Black, permeámetro de carga constante, olla y membrana de presión.

Tabla 1 | Características de los tratamientos.

Tratamiento	D_a (g cm^{-3})	K_s (cm h^{-1})	CC (% gravimétrico)	PMP (% gravimétrico)
T1	1.52	11.4	22.97	13.40
T2	1.38	31.9	21.65	13.41
T3	1.12	44.4	22.96	14.05

El suelo de los tres tratamientos se introdujo en bolsas de plástico transparente (Figura 1), colocando un gotero por cada contenedor. Se realizaron un total de 126 ensayos dado que se usaron dos goteros, con caudales nominales de 3 y 4 l h⁻¹, y siete tiempos de riego (5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 minutos) con tres repeticiones. El tiempo de riego máximo de los ensayos, es el valor requerido para reponer una evapotranspiración diaria del cultivo de 5 a 6 mm día⁻¹ el cual es un valor frecuentemente usado en México en hortalizas.



Figura 1 | Contenedores con suelo, previo al riego.

Características del sistema de riego

El experimento se realizó en un sitio cerrado para garantizar que el agua en el suelo fuera exclusivamente del riego aplicado. Se usó un sistema de riego con longitudes pequeñas de la tubería de conducción (principal) y de distribución (laterales) y goteros con sistema de autorregulación de la presión para garantizar caudales similares en todos los emisores (Figura 2); en efecto, previo a la ejecución del experimento se hizo una prueba de riego, obteniendo un coeficiente de uniformidad mayor del 98%, de acuerdo al criterio del cuarto inferior (Pizarro, 1996). El pequeño sistema de riego se operó con una bomba de 0.5 HP con una presión a la descarga de 1 atmósfera.

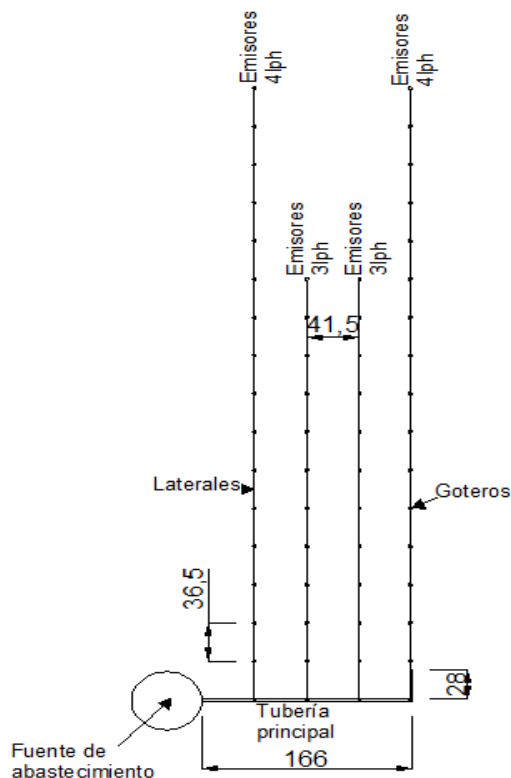


Figura 2 | Disposición del sistema de riego (acotaciones en cm).

Toma de muestras de suelo

En cada ensayo se tomaron muestras de suelo para determinar su contenido de humedad, antes e inmediatamente después a la aplicación del riego.

Después de la aplicación del riego se rompió la bolsa de plástico por un costado (Figura 3a) y con apoyo de una espátula se hizo un corte longitudinal, pasando por centro del contenedor (Figura 3b) con el objetivo de visualizar y medir la geometría del bulbo húmedo, y para tomar muestras de suelo para determinar su contenido de humedad (Figura 3c).



Figura 3 | Preparación del contenedor para la medición geométrica y toma de muestras de suelo del bulbo húmedo.

Una vez identificado el bulbo de humedecimiento, se midieron su diámetro promedio en la superficie del suelo (d) y su profundidad en el centro del contenedor, justos debajo del punto de aplicación del agua (z) (Figura 4).

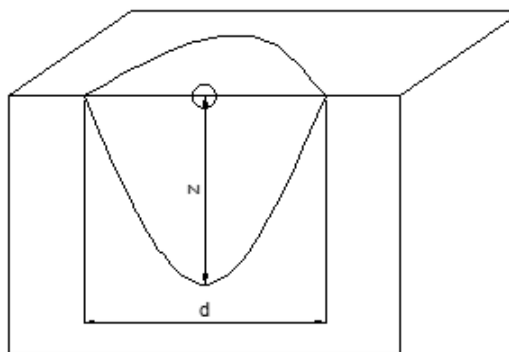


Figura 4 | Representación del diámetro y profundidad de mojado del bulbo húmedo.

Para obtener la distribución de la humedad del bulbo de mojado, se tomaron muestras de suelo en el centro de los cuadros de una cuadrícula trazada en el corte longitudinal del contenedor. Para los primeros tres tiempos de riego el bulbo se dividió en cuatro partes (Figura 5) y para los últimos cuatro se dividió en seis partes (Figura 6).

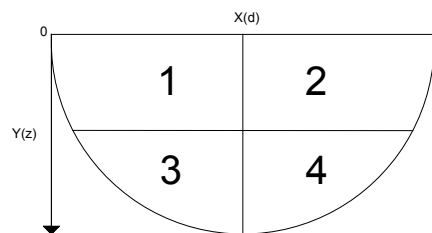


Figura 5 | Sitios de muestreo de suelo, para los tiempos de riego de 5, 10 y 15 minutos.

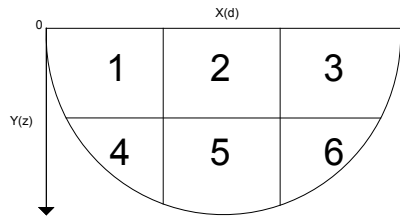


Figura 6 | Sitios de muestreo de suelo, para los tiempos de riego de 20,25, 30 y 35 minutos.

Con el contenido de humedad gravimétrica y la densidad aparente del suelo se obtuvo el contenido de humedad volumétrico. El peso seco del suelo, usado para el cálculo del contenido de humedad gravimétrica, se obtuvo después de permanecer en una estufa por 24 horas a 105°C.

Modelos evaluados y modelo propuesto

Se evaluaron cuatro modelos empíricos, tres de ellos son referidos con mucha frecuencia por los investigadores del tema, y el otro modelo fue propuesto en esta investigación. Los modelos consideran algunas propiedades físicas de los suelos, condiciones de humedad inicial y después del riego, características de los emisores, y algunas características de operación del riego como volumen de agua aplicada (tiempo de riego).

Modelo de Schwartzman y Zur (1986)

$$d = 1.82 V^{0.22} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{-0.17} \quad (1)$$

$$z = 2.54 V^{0.63} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{0.45} \quad (2)$$

Amin y Ekhmaj (2006)

Los parámetros de ajuste fueron obtenidos con información experimental de Taghavi *et al.* (1984), Anglelakis *et al.* (1993), Hammami *et al.* (2002) y Li *et al.* (2003) y que posteriormente fue verificado con información experimental en distintas condiciones de laboratorio y de campo, de Risse *et al.* (1989), Yitayew *et al.* (1998), Palomo *et al.* (2002) y Li *et al.* (2004):

$$d = 0.2476 \Delta\theta^{-0.5626} V^{0.2686} q^{-0.0028} K_s^{-0.0344} \quad (3)$$

$$z = 2.0336 \Delta\theta^{-0.383} V^{0.365} q^{-0.101} K_s^{-0.195} \quad (4)$$

$$\text{válidas para: } 0.7 \text{ l/h} \leq q \leq 8.29 \text{ l/h}$$

$$0.42 \text{ cm/h} \leq K_s \leq 8.39 \text{ cm/h}$$

Keyvan y Troy (2011)

El experimento se realizó in situ, cavando un hoyo en el suelo de 1.5 m de ancho por 1.0 m de profundidad, después de cada riego para medir el diámetro y la profundidad del bulbo de mojado. El modelo encontrado fue el siguiente:

$$d = q^{0.543} K_s^{0.772} t^{0.419} \Delta\theta^{-0.687} Da^{0.305} \quad (5)$$

$$z = q^{0.398} K_s^{0.208} t^{0.476} \Delta\theta^{-1.253} Da^{0.445} \quad (6)$$

$$\text{válidas para: } 2.5 \text{ l/h} \leq q \leq 6.15 \text{ l/h}$$

$$K_s = 3.66 \text{ cm/h}$$

$$D_a = 1.485 \text{ g/cm}^3$$

donde z es el avance vertical del frente de humedad (cm) en el centro del bulbo húmedo; d es el diámetro de mojado en la superficie (cm); V es el volumen de agua aplicado (m^3); q es el gasto del emisor (l h^{-1}); K_s es la conductividad hidráulica a saturación (cm h^{-1}); $\Delta\theta$ es el cambio promedio de humedad en el bulbo húmedo durante el riego ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); D_a es la densidad aparente del suelo (gr cm^{-3}); t es el tiempo del riego (h); MO es el contenido de materia orgánica (%).

Modelo propuesto

Considerando las experiencias de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y Keyvan y Troy (2011), se propusieron los siguientes modelos no lineales que contemplan el contenido de materia orgánica (MO) en el suelo:

$$d = A_1 q^{\alpha_1} K_s^{\beta_1} t^{\nu_1} \Delta\theta^{\delta_1} D_a^{\lambda_1} MO^{\varepsilon_1} \quad (7)$$

$$z = A_2 q^{\alpha_2} K_s^{\beta_2} t^{\nu_2} \Delta\theta^{\delta_2} D_a^{\lambda_2} MO^{\varepsilon_2} \quad (8)$$

donde q , K_s , t , $\Delta\theta$ y D_a tienen el mismo significado y unidades que en las ecuaciones (1) a (6), y A_1 , A_2 , α_1 , α_2 , β_1 , β_2 , ν_1 , ν_2 , δ_1 , δ_2 , λ_1 , λ_2 , ε_1 , ε_2 son coeficientes de ajuste óptimo.

Evaluación de la bondad de ajuste del modelo

Se hizo una evaluación de la representatividad de cada modelo en función del error medio (ME), raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE), la eficiencia del modelo (EF) (conocido también como coeficiente de Nash-Sutcliffe) y coeficiente de determinación (r^2).

$$ME = \frac{1}{N} |\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)| \quad (9)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2 \right]^{1/2} \quad (10)$$

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \quad (11)$$

donde N , es el número total de datos; S_i , es el i -ésimo dato simulado; O_i , es el i -ésimo datos observado; y $\bar{O}$, es el promedio de los datos observados.

Para verificar la inexistencia de causa de error, en la estimación del diámetro y profundidad del bulbo húmedo, por efecto de alguna de las variables involucradas en el modelo se hizo un análisis gráfico de sus residuales y una comparación de las varianzas mediante la prueba de Bartlett.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Geometría de los bulbos de humedad

Las pequeñas diferencias del contenido de MO en el suelo y del caudal de los goteros produjeron un efecto positivo en la geometría del bulbo húmedo (Figura 7). Para un mismo caudal, se observó un incremento principalmente en el diámetro de mojado a medida que es mayor el contenido de MO, produciendo una forma más esférica. Para un mismo contenido de MO y diferente caudal del emisor, se observó un mayor diámetro y profundidad de mojado en el de mayor caudal como lo reportó Pizarro (1996).

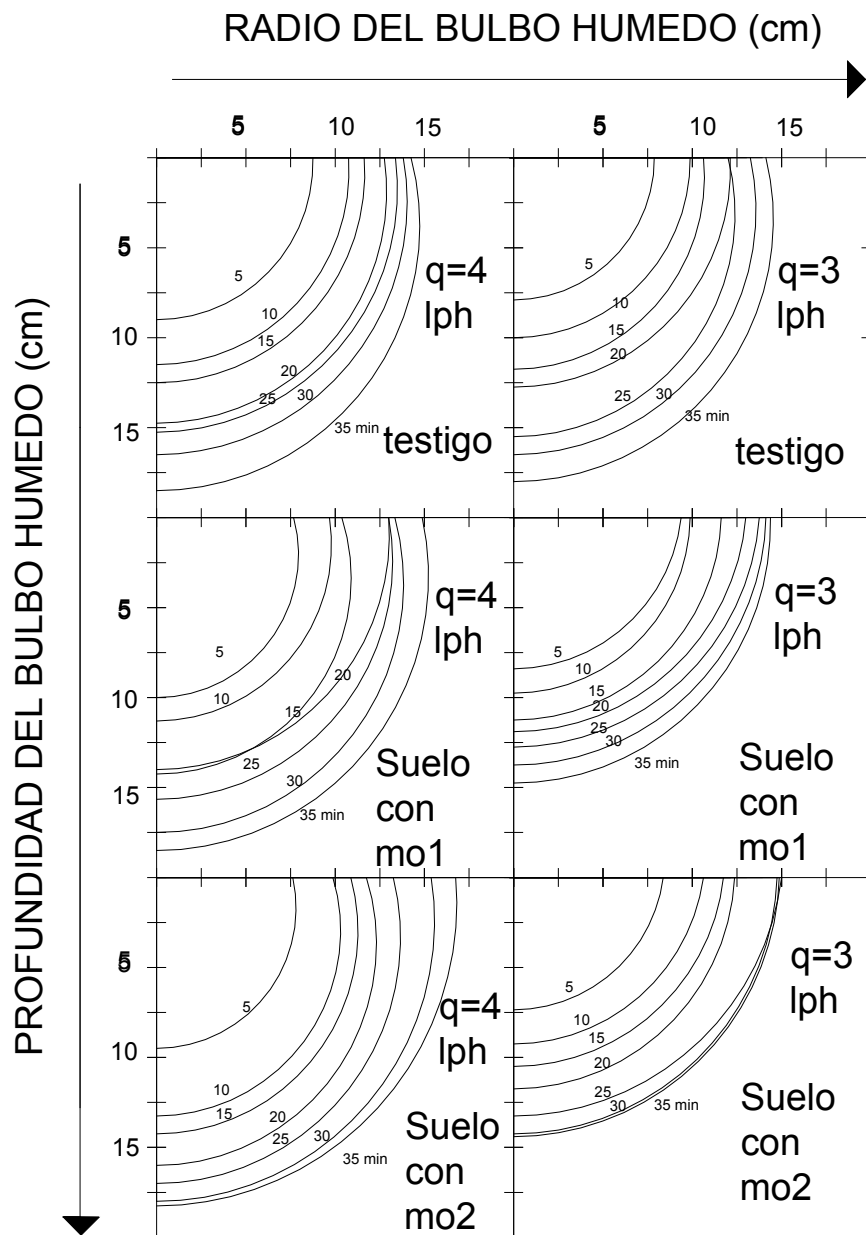


Figura 7 | Geometría del bulbo de humedecimiento para 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 minutos de riego.

Comportamiento del contenido de humedad

En los tres tratamientos, el contenido de humedad resultó mayor en la zona cercana al gotero, disminuyendo gradualmente conforme se aproxima al perímetro del bulbo de humedecimiento (Figuras 8, 9, 10 y 11). Se apreció una mayor uniformidad de la distribución de la humedad a medida a que incrementa el contenido de MO, observándose menor diferencia de humedad entre el centro y el perímetro del bulbo húmedo en el tratamiento tres. Esto se explica debido a que una mayor presencia de MO incrementó la conductividad hidráulica a saturación y el porcentaje de microporos, incrementando el efecto capilar.

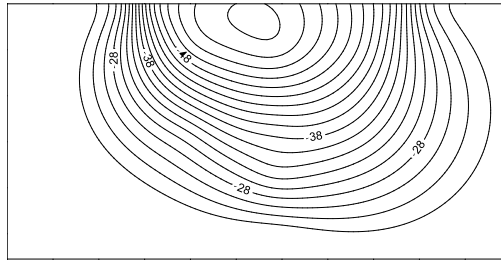


Figura 8 | Isolíneas de humedad volumétrica (%) para el T1 con un gasto de 4 l h^{-1} y 35 minutos de riego.

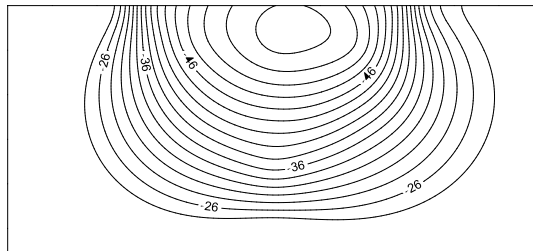


Figura 9 | Isolíneas de humedad volumétrica (%) para el T2 con un gasto de 4 l h^{-1} y 35 minutos de riego.

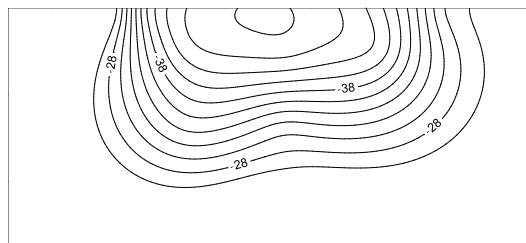


Figura 10 | Isolíneas de humedad volumétrica (%) para el T3 con un gasto de 4 l h^{-1} y 35 minutos de riego.

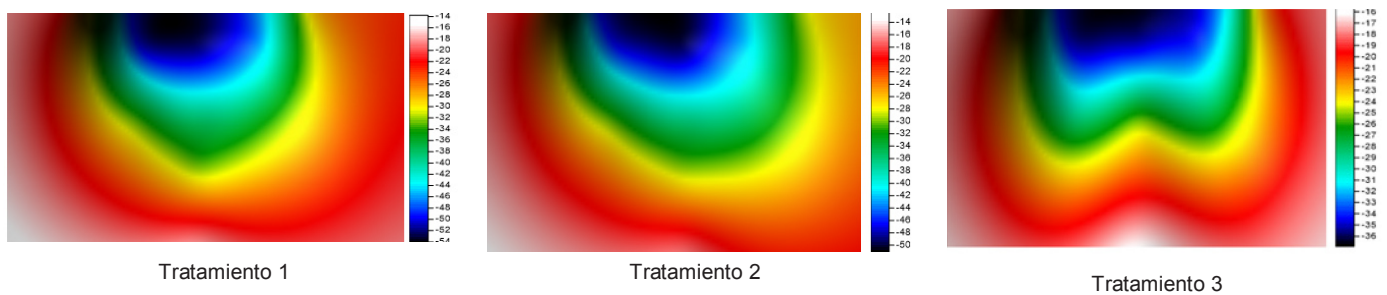


Figura 11 | Isolíneas de humedad volumétrica (%) con un gasto de 3 l h^{-1} y 35 minutos de riego.

Parámetros de ajuste del Modelo propuesto

El modelo propuesto en esta investigación resultó en las ecuaciones (11) y (12).

$$d = 35.426q^{0.0418}K_s^{-0.0179}t^{0.3216}\Delta\theta^{-0.0232}Da^{-0.1535}Mo^0 \quad (12)$$

$$z = 10.7989q^{0.6030}K_s^{-0.0277}t^{0.3378}\Delta\theta^{0.0109}Da^{-0.0770}Mo^0 \quad (13)$$

válidas para: $3.0 \text{ l/h} \leq q \leq 4.0 \text{ l/h}$

$11.4 \text{ cm/h} \leq K_s \leq 44.4 \text{ cm/h}$

Matemáticamente, el contenido de la materia orgánica no mostró un efecto significativo en el comportamiento del diámetro y profundidad del bulbo húmedo; sin embargo, su efecto físico quedó representado en la densidad aparente y la conductividad hidráulica a saturación, como se aprecia en la Tabla 1 y en las Figuras 7, 8, 9, 10 y 11.

Evaluación de desempeño de los modelos

Según los valores del error medio (ME), de la raíz del cuadrado medio del error (RMSE), de la eficiencia del modelo (EF) y del coeficiente de determinación (r^2), el modelo propuesto en esta investigación resultó notablemente mejor que el resto de los modelos analizados para estimar el diámetro y la profundidad del bulbo húmedo (Tabla 2). Los parámetros estadísticos de ajuste empleados en la evaluación resultaron muy próximos a los óptimos en el caso del modelo propuesto ($ME \approx 0$, $RMSE \approx 0$, $EF \approx 1$ y $r^2 \approx 1$).

Tabla 2 | Resultados de los parámetros estadísticos de los modelos estudiados.

Modelo	ME (cm)		RMSE (cm)		EF		r^2	
	d	z	d	z	d	z	d	z
Schwartzman y Zur (1986)	4.73	11.28	5.85	14.22	-0.63	-20.02	0.44	0.48
Amin y Ekhmaj (2006)	4.12	14.74	42.72	24.41	-85.67	-60.94	0.44	0.17
Keyvan y Troy (2011)	53.59	20.49	66.95	28.19	-211.84	-81.55	0.22	0.01
Propuesto	0.11	0.23	1.25	0.83	0.90	0.92	0.92	0.93

Al modelo propuesto, le siguieron en precisión de mayor a menor, los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y Keyvan y Troy (2011) lo cual se aprecia gráficamente en las Figuras 12, 13, 14, 15, 16 y 17.

El modelo de Schwartzman y Zur (1986) es el más sencillo porque involucra menos variables; sin embargo, el volumen de agua aplicado (V) integra al tiempo (t) y al caudal del emisor (q) y la conductividad hidráulica a saturación (K_s) contempla la textura y el contenido de materia orgánica en el suelo. Una desventaja de este modelo es que tiende a incrementar drásticamente el error en la estimación de la profundidad del bulbo húmedo conforme aumenta el tiempo de riego, particularmente en el caudal de 4 l h^{-1} (Figuras 13, 15 y 17), este error para tiempos de riego grandes fue menor en el caudal de 3 l h^{-1} .

Son muy notorios los errores de sobrestimación del modelo de y Keyvan y Troy (2011) a pesar de que contempla la misma estructura matemática y las mismas propiedades del suelo que el modelo propuesto en esta investigación. Esto se puede atribuir a las grandes diferencias de los valores de la conductividad hidráulica a saturación del suelo empleado en el experimento de Keyvan y Troy (2001) (3.66 m h^{-1}) y el de este trabajo (de 11.4 a 44.4 cm h^{-1}).

El modelo de Amin y Ekhmaj (2006) presentó una tendencia oscilatoria, en algunos ensayos subestimó los diámetros y profundidades del bulbo de mojado y en otros casos los sobrestimó que podría atribuirse a que los rangos de validez de las conductividades hidráulicas de este modelo son inferiores a las de los tratamientos de esta investigación. Puesto que no resultó

un incremento del error en la estimación del diámetro y profundidad del bulbo húmedo a medida que incrementa el valor de la conductividad hidráulica de los tratamientos estudiados, considerando que el valor más pequeño (11.4 cm h^{-1} del tratamiento 1) es el que más se aproxima al rango del validez del modelo de Amin y Ekhmaj (2006) (0.42 a 8.39 cm h^{-1}), sugiere entonces que las condiciones de experimentación fueron distintas y que hay una influencia en los métodos empleados para obtener los parámetros involucrados en los modelos. En este escrito, se especifican claramente los métodos empleados para el cálculo de K_s , D_a , CC , PMP , MO y la forma de muestreo del suelo y obtención de la humedad, pero en algunas de las investigaciones que sustentan los modelos empíricos comparados no se indican.

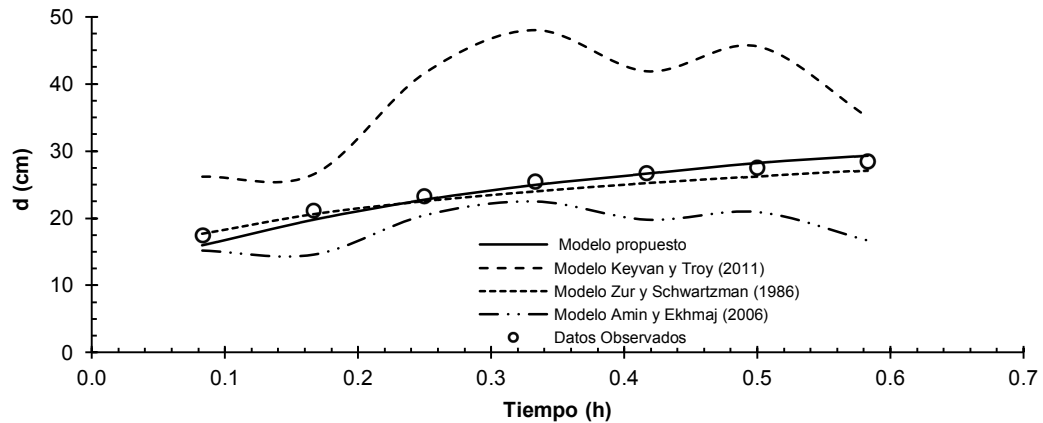


Figura 12 | Valores observados y estimados en el tiempo, del diámetro del bulbo húmedo, con un gasto de 4 l h^{-1} para el T1.

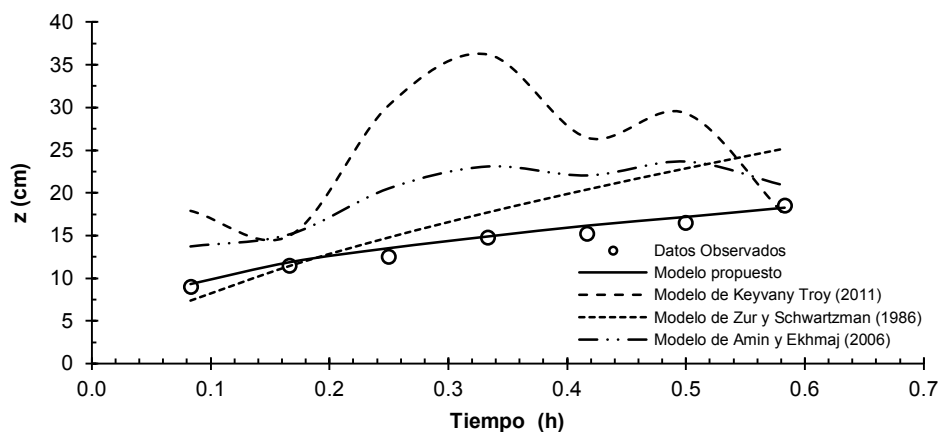


Figura 13 | Valores observados y estimados en el tiempo, de la profundidad del bulbo húmedo, con un gasto de 4 l h^{-1} para el T1.

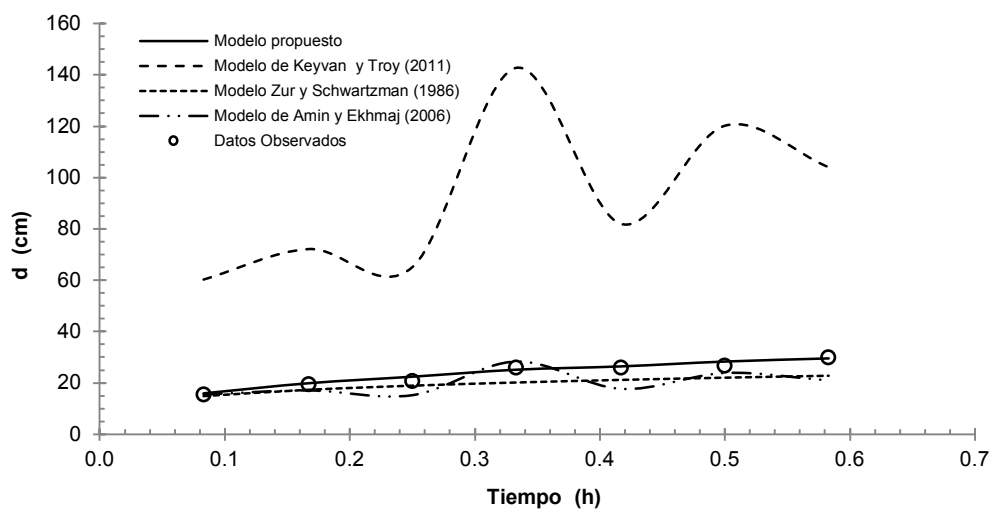


Figura 14 | Valores observados y estimados en el tiempo, del diámetro del bulbo húmedo, con un gasto de 4 l h^{-1} para el T2.

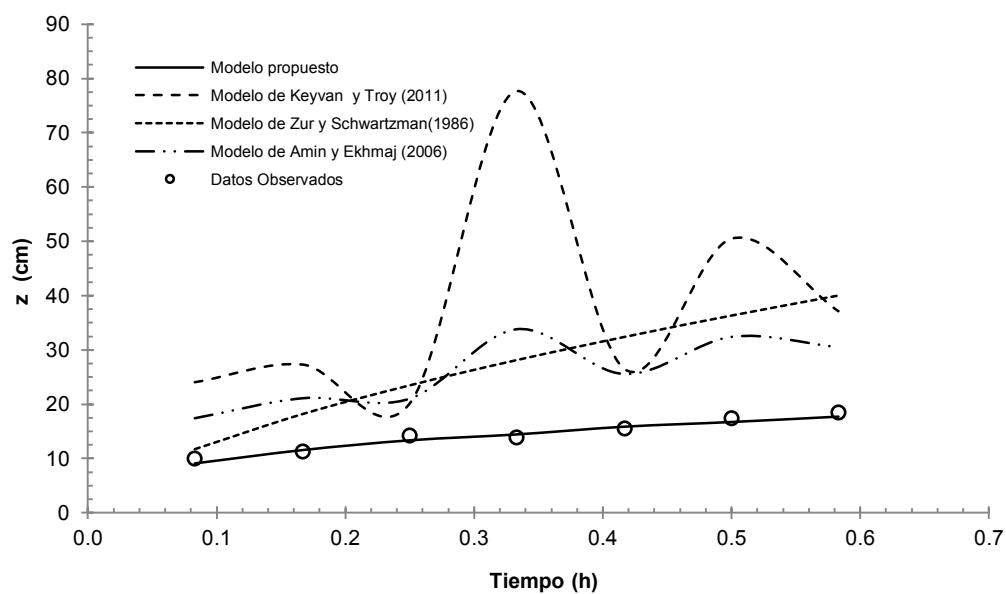


Figura 15 | Valores observados y estimados en el tiempo, de la profundidad del bulbo húmedo, con un gasto de 4 l h^{-1} para el T2.

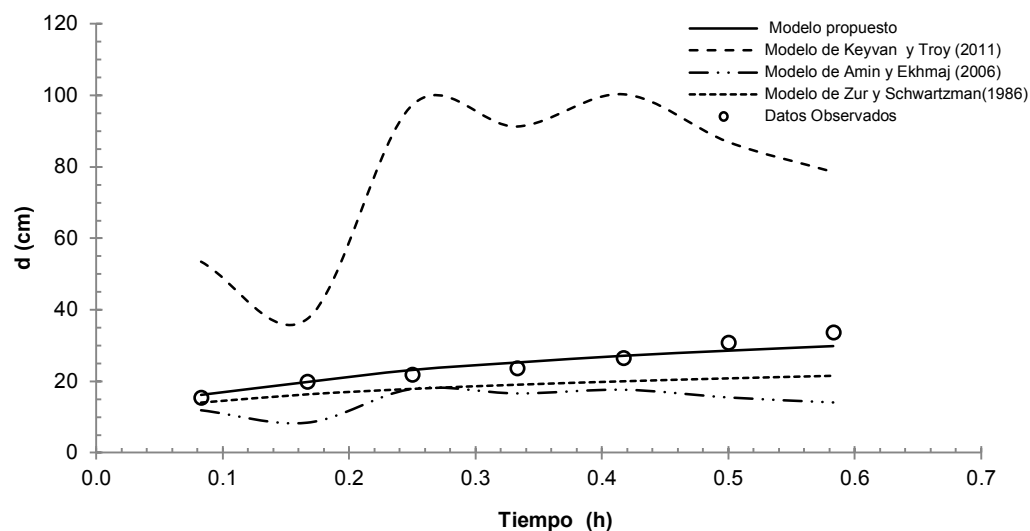


Figura 16 | Valores observados y estimados en el tiempo, del diámetro del bulbo húmedo, con un gasto de 4 l h^{-1} para el T3.

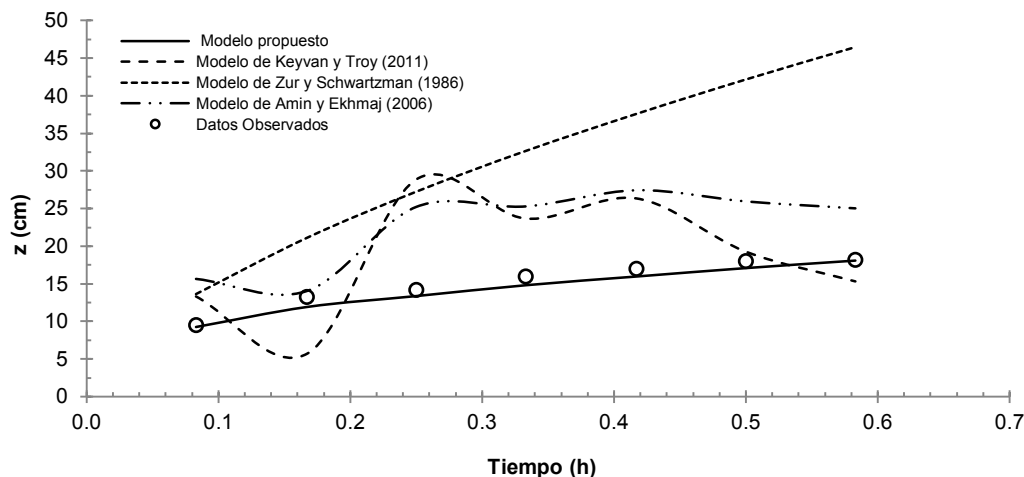


Figura 17 | Valores observados y estimados en el tiempo, de la profundidad del bulbo húmedo, con un gasto de 4 l h^{-1} para el T3.

Prueba de Bartlett

La prueba de Bartlett indicó, con una probabilidad del 95%, que no existen diferencias significativas entre las varianzas de los tres tratamientos lo cual implica que los modelos propuestos para estimar la profundidad y el diámetro de mojado son igualmente confiables en los tres tratamientos de suelo estudiados, esto se aprecia gráficamente en una tendencia no definida de los residuales en la estimación del diámetro y profundidad del bulbo de humedecimiento, por el efecto del contenido de materia orgánica (Figuras 18 y 19).

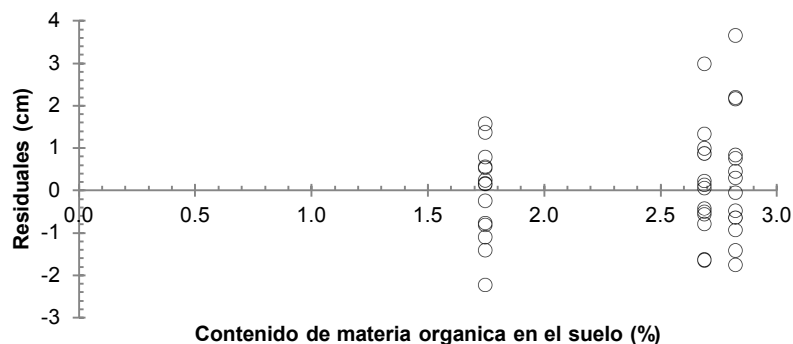


Figura 18 | Residuales de la variable materia orgánica para representar el diámetro del bulbo húmedo.

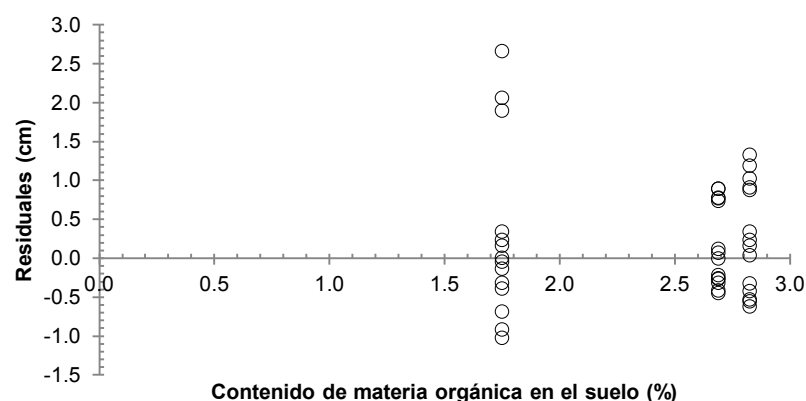


Figura 19 | Residuales de la variable materia orgánica para representar la profundidad del bulbo húmedo.

Investigaciones futuras

Se deben realizar pruebas experimentales in situ o en laboratorio evitando modificar las condiciones reales de los suelos, en suelos de diferentes texturas, con diferentes contenidos de MO y de humedad inicial, con diferentes caudales y distintos tiempos de riego (láminas de agua aplicada) para representar la gama de suelos de interés agrícola de una región o país.

Los costosos experimentos deberían ser aprovechados para modelar el comportamiento del agua en el suelo mediante modelos matemáticos basados en principios físicos los cuales podrían servir para generar información útil para el diseño y la operación de los sistemas de riego.

CONCLUSIONES

Se generaron dos ecuaciones empíricas no lineales para el cálculo de la profundidad (z) y el diámetro (d) de un suelo con tres contenidos de materia orgánica en riego por goteo superficial en función del caudal del emisor, del tiempo de riego, de la variación del contenido de humedad debido al riego y de la densidad aparente y la conductividad hidráulica a saturación del suelo. Estas dos ecuaciones presentaron un mucho mejor ajuste a los datos observados que los modelos de Schwartzman y Zur (1986), Amin y Ekhmaj (2006) y Keyvan y Troy (2011).

Se observó un efecto positivo de la presencia de materia orgánica, en la geometría y en el patrón de distribución de la humedad del bulbo de mojado del suelo estudiado, a pesar de que las diferencias en sus contenidos fueron pequeñas. Mejoró la capilaridad y la conductividad hidráulica a saturación, generando mayores diámetros de mojado y una ligera disminución en la profundidad del bulbo humedad, y una mejor distribución del agua.

REFERENCIAS

- Angelakis, A. N., Kadir, T. N., Rolston, D.E. 1993. Time-dependent soil-water distribution under a circular trickler source. *Water Management*, 7(3), 225-235, doi: 10.1007/BF01675305
- Amin, M. S. M., Ekhmaj, A. I. M. 2006. DIPAC-Drip Irrigation Water Distribution Pattern Calculator. 7th International Micro Irrigation Congress, 10-16 Sept. Pwtc, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Ben-Asher, J., Charach, CH., Zeme, A. 1986. Infiltration and water extraction from Trickle Irrigation Source: The effective hemisphere model. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50(4), 882-887, doi:10.2136/sssaj1986.03615995005000040010x
- Estrada-Raya, M. 1995. Modelos para representar patrones de humedecimiento en riego por cintas de goteo. Tesis de licenciatura, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México: 14-45.
- Golberg, D., Rinot, M., Karu, N. 1971. Effect of Trickle Irrigation Intervals on Distribution and Utilization of Soil Moisture in Vineyard. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 35(1), 127-130, doi:10.2136/sssaj1971.03615995003500010037x
- Hammami, M., Hedi, D., Jelloul, B., Mohamed, M. 2002, Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: Theory and numerical aspect. *Irrig and Drain*, 51(4), 347-360, doi: 10.1002/ird.60
- Keyvan, M., Troy, P. 2011. Wetting Pattern Models for Drip Irrigation: New Empirical Model. *J. Irrig. Drain. Eng.* 534(8), 1-7, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000320#sthash.MIqoZBsT.dpuf](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320#sthash.MIqoZBsT.dpuf)
- Ledesma-Ledesma, D. 1995. Modelos para representar patrones de humedecimiento aplicando riego por goteo. Tesis de licenciatura, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México: 5-43.
- Li, J., Zhang, J., Ren, L. 2003. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source. *Irrig. Sci.*, 22(1), 19-30, doi:10.1007/s00271-003-0064-8
- Li, J., Zhang, J., Rao, M. 2004. Wetting patterns and nitrogen distributions as affected by fertigation strategies from a surface point source. *Agri. Water Manag.*, 67(2), 89-104, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2004.02.002>
- Palomo, M. J., Moreno, F., Fernández, J. E., Díaz-Espejo, A., Girón, I. F. 2002. Determining water consumption in olive orchards using the water balance approach. *Agric. Water Manage.*, 55(1), 15-35, [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00182-2](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00182-2)
- Pizarro-Cabello, F. 1996. Riegos Localizados de alta frecuencia. Tercera edición, Mundi Prensa, México, D. F.: 23 – 60.
- Risse, L. M., Chesness, J. L. 1989. A simplified design procedure to determine the wetted radius for a trickle emitter. *Transactions of the ASAE*, 32(6), 1909-1914, doi: 10.13031/2013.31242
- Taghavi, S. A., Marino, M. A., Rolston, D. E. 1984. Infiltration from trickle irrigation source. *J. of Irrig. And Drainage Eng.*, 110(4), 331-342, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1984\)110:4\(331\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1984)110:4(331))
- Schwartzman, M., Zur, B. 1986. Emitter Spacing and Geometry of Wetted Soil Volume. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112(3), 242-253, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1986\)112:3\(242\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1986)112:3(242))
- Yitayew, M., Khan, A. A., Warrick, A. W. 1998. In situ measurements of soil hydraulic conductivity using point application of water. *Applied Eng. in Agriculture*, 14(2), 115-120, doi: 10.13031/2013.19372