

EVALUACIÓN DE MODELOS EMPÍRICOS EN LA ESTIMACIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO SUPERFICIAL

Alejandro Quintero Cabriales^{1,3*}; Jorge Víctor Prado Hernández^{2,3}; Irouri Cristóbal-Muñoz^{4,3}.

¹Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México.
alex9761910@gmail.com (Autor de correspondencia)

²Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. vpradohdez@gmail.com

³Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230, México.

⁴Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, México, C. P. 56230. irouri.cristobal.munoz@gmail.com

Resumen

En el mundo y en México la eficiencia del uso del agua en la agricultura es muy baja, por lo general menor al 50%. La tecnología de riego por goteo puede ser una excelente opción para enfrentar esta problemática. Consecuentemente, es de suma importancia estudiar la evolución temporal de la geometría del frente de humedecimiento durante el riego para el diseño de sistemas de riego de precisión. El objetivo de la presente investigación fue evaluar modelos matemáticos empíricos para la estimación del diámetro y profundidad del bulbo húmedo en riego por goteo superficial en un suelo franco arenoso, con tres caudales (1.58, 2.92 y 7.48 l h⁻¹) y diferentes condiciones de humedad inicial en el suelo. Asimismo, se analizó el impacto de las diferentes condiciones de riego en el comportamiento del frente húmedo. Se evaluaron los modelos obtenidos por Amin & Ekhmaj (2006), Malek & Peters (2011), Al-Ogaidi *et al.* (2015), Cruz-Bautista *et al.* (2016) y Prado-Hernández *et al.* (2017), respecto a la estimación del diámetro y profundidad del frente húmedo. El modelo con mejor desempeño para el diámetro fue el de Amin & Ekhmaj (2006) y el de peor desempeño fue el de Malek y Peters (2011). Considerando la estimación de la profundidad del frente húmedo, el modelo con mejor desempeño fue el de Amin & Ekhmaj (2006) y los menos acertados fueron los modelos de Malek y Peters (2011), Cruz-Bautista *et al.* (2016) y Prado-Hernández *et al.* (2017). El modelo de Amin & Ekhmaj (2006) resultó de aceptable a muy bueno en la estimación del diámetro y profundidad del bulbo húmedo en un suelo de textura franco arenosa (valores de eficiencia de modelo entre 0.66 a 0.96).

Palabras claves: Frente de humedecimiento, riego por goteo superficial, caudal de riego, modelación del riego, bulbo de mojado.

Introducción

La agricultura es la actividad con mayor consumo de agua en el mundo, en la producción de alimentos se emplea alrededor del 70% del agua que se extrae de las diversas fuentes. Para satisfacer la creciente demanda de alimentos a nivel mundial en 2030, se requiere incrementar la producción de alimentos en un 50% (FAO, 2020). Además, en el mundo y en México la eficiencia del uso del agua en la agricultura es muy baja, por lo general menor al 50% (CAF, 2019). La tecnología de riego por goteo puede ser una excelente opción para enfrentar esta problemática, debido a su alta eficiencia, optimización en la aplicación de fertilizantes, aumento del rendimiento y calidad de los cultivos, entre otros beneficios (Cristóbal-Muñoz, 2022).

El conocimiento del movimiento del agua en el suelo en riego por goteo puede ofrecer mejores bases para proyectar el riego y para planear las prácticas de riego a nivel parcelario. Es importante que diseñadores de los sistemas de riego conozcan las dimensiones del bulbo húmedo generado dentro del sistema radicular del cultivo. El conocimiento del frente húmedo es muy útil para realizar un buen diseño y operación; esto es que la aplicación del riego resulte eficiente, evitando patrones de distribución de la humedad irregulares.

Diversos autores como Amin & Ekhmaj (2006), Malek & Peters (2011), Al-Ogaidi *et al.* (2015), Cruz-Bautista *et al.* (2016) y Prado-Hernández *et al.* (2017), han estudiado los patrones de humedecimiento en distintos suelos con diferentes estrategias, creando modelos para la predicción del movimiento del agua a través del suelo e intentando cada vez ser más precisos. Existen modelos matemáticos empíricos que contemplan las características del suelo y operación del sistema de riego, en la estimación de la evolución temporal del diámetro y profundidad del frente de avance del bulbo húmedo en riego por goteo. Dichos modelos se han obtenido con diferentes estrategias metodológicas por lo que resulta necesario evaluar sus capacidades predictivas (Cristóbal-Muñoz, 2022).

Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo en dos etapas: una etapa experimental y otra de gabinete. En la etapa experimental se hicieron mediciones a través del tiempo sobre la geometría del frente de avance del bulbo húmedo en riego por goteo superficial, aplicado a un suelo franco arenoso dentro de una estructura cúbica de acrílico de cristal (Figura 1). La geometría del bulbo se midió manualmente con una regla y el contenido de humedad inicial en suelo se estimó con sensores de humedad de alta precisión conectados a unos dataloggers marca HOB0. Se aplicaron seis riegos con emisores de 1.58, 2.92 y 7.48 l h⁻¹ (marca Netafim); dos riegos con cada caudal.

En la etapa de gabinete, se evaluó el desempeño de los modelos matemáticos empíricos de Amin y Ekhmaj (2006); Malek y Peters (2011); Al-Ogaidi *et al.* (2015); Cruz-Bautista *et al.* (2016) y Prado-Hernández *et al.* (2017) para estimar el diámetro y profundidad del frente de humedecimiento. La evaluación de los modelos se hizo con medidas de dispersión y asociación, y se realizó una comparación gráfica con base en los datos medidos en el experimento. Complementariamente se analizó la geometría del frente de humedecimiento de los seis riegos.

Módulo experimental

Se siguió la metodología descrita por Cristóbal-Muñoz et al. (2022) para la instalación del experimento en el Laboratorio de Riego y Drenaje del Departamento de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo, México.

Estructura cubica de acrílico para pruebas de riego

El cubo de acrílico consiste en cinco lados de acrílico de 6 mm de espesor, soportados por una estructura de aluminio y cuatro columnas del mismo material colocadas en la mitad de cada lateral (Figura 1). El sistema cuenta con drenaje en la base del cubo, conformado de 16 orificios de 8 mm ordenados en cuatro filas y cuatro columnas.



Figura 1. Cubo de acrílico armado.

Descripción y verificación del funcionamiento del sistema de riego

El riego por goteo se suministró con goteros de botón auto-compensantes (marca Netafim) insertados en manguera de polietileno de baja densidad. La energía hidráulica se suministró por una bomba centrífuga de ½ HP a 120 V y 60 Hz de frecuencia. El sistema de riego se muestra en la Figura 2.

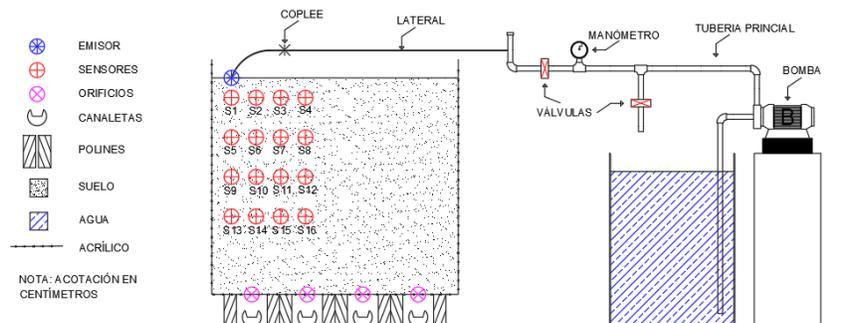


Figura 2. Vista lateral del sistema de riego y cubo de acrílico.

Calibración de los sensores de humedad del suelo

Para medir la humedad volumétrica del suelo se usaron sensores inteligentes de humedad S-SMC-M005 (Honsset HOBO ® corporation), los cuales se calibraron considerando lecturas en agua destilada y en aire, verificando que las lecturas de los sensores estuvieran en el rango aceptable dado por el fabricante como se muestra en el Cuadro 2. Los sensores S-SMC-M005 y el TDR 300 tuvieron un error de $\pm 3\%$.

Cuadro 1. Valores permisibles en la verificación de los sensores de humedad del suelo (m^3/m^3).

Sensor	Aire	Agua
S-SMC-M005	-0.26 a -0.13	0.47 a 0.57

Muestreo y preparación del suelo

El muestreo del suelo se realizó en el campo experimental Montecillos del Departamento de Irrigación de la Universidad Autónoma Chapingo, con coordenadas de latitud de $19^{\circ}29'$, longitud $98^{\circ}52'$ y altitud de 2250 MSNM. Se extrajo suelo con palas y picos, posteriormente se secó al aire libre en un invernadero durante 20 días hasta que se llegó a niveles de humedad de $0.07 m^3/m^3$, medidos con los sensores de humedad. Se realizó un tamizado del suelo evitando terrones. Se trasladó el suelo al Laboratorio de Riego y Drenaje del Departamento de Suelos, donde se introdujo a una densidad aparente de $1.4 g\ cm^{-3}$ en un cubo de un metro cúbico de volumen (Figura 3).



Figura 3. Vista frontal del cubo de acrílico relleno con el suelo después de un riego.

Características del suelo

Para la caracterización del suelo (Cuadro 2) se utilizaron diversos métodos. Para la textura del suelo se empleó el método de hidrómetro de Bouyoucos; para densidad aparente (D_a) el método del terrón y parafina; Walkley y Black para el contenido de materia orgánica ($M.O.$), olla de presión para el contenido de humedad gravimétrico a capacidad de campo (θ_{CC}), membrana de presión para el contenido de humedad

gravimétrico a punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) y permeámetro para la conductividad hidráulica a saturación (K_s). El contenido de humedad volumétrico se obtuvo multiplicando el contenido de humedad gravimétrico por la densidad aparente del suelo.

Cuadro 2. Características del suelo.

Porcentaje del tipo de partículas en el suelo (%)	Textura	D_a (g cm ⁻³)	K_s (cm h ⁻¹)	θ_{CC} (cm ³ cm ⁻³)	θ_{PMP} (cm ³ cm ⁻³)	M.O. (%)
Arena= 51.60 Arcilla= 19.10 Limo= 29.30	Franco Arenosa	1.40	0.49	0.355	0.168	0.38

Llenado del contenedor del suelo e instalación de los sensores de humedad del suelo

El cubo de acrílico se llenó de suelo en capas de 5 cm con una densidad de 1.4 g cm⁻³, para formar un espesor de 85 cm. Se vertió un peso tal que después de compactarlo a los 5 cm, con un apisonador de madera, tuviera la densidad deseada (Figura 4).



Figura 4. Instalación, nivelación y verificación del correcto funcionamiento de los sensores.

Paralelamente se colocaron los sensores de humedad como se muestra en la Figura 5, cuidando colocar los cables de los anteriormente mencionados de manera ordena, como lo indica la Figura 6.

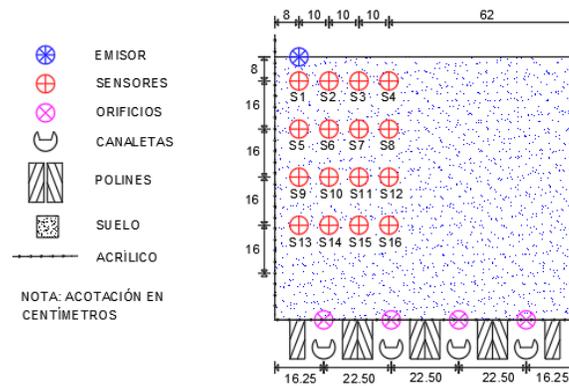


Figura 5. Vista lateral del cubo de acrílico con los sensores de humedad.

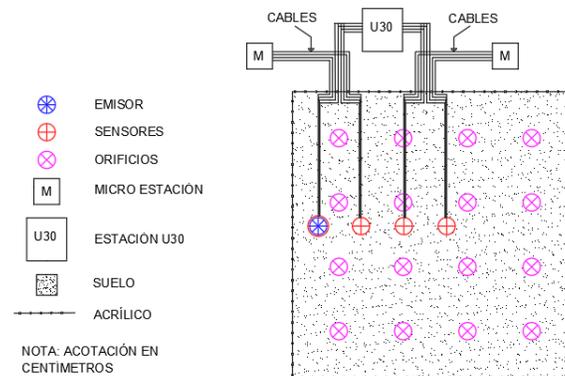


Figura 6. Vista en planta del cubo de acrílico y los sensores de humedad.

Pruebas de riego

Se aplicaron seis riegos, con dos riegos por cada uno de los tres caudales considerados (1.58, 2.92 y 7.48 L h⁻¹). Dichos caudales se obtuvieron de promediar aforos a una presión de 8 PSI. Los dos riegos en cada caudal, se aplicaron con humedades iniciales (θ_i) diferentes, procurando valores entre θ_{PMP} y θ_{CC} , y dos de ellos por debajo de θ_{PMP} . Se definieron diferentes intervalos de tiempo para registrar mediciones del diámetro (d) y la profundidad (z) del frente de humedecimiento (Cuadro 3).

Cuadro 3. Información general de los riegos.

Número de Riego	Caudal (L h ⁻¹)	Tiempo de Riego (h)	θ_i promedio (cm ³ cm ⁻³)	Número de lecturas en d y z
1	2.92	6.50	0.082	12
2	2.92	5.00	0.215	13
3	1.58	6.00	0.118	11
4	1.58	5.00	0.240	13
5	7.48	3.00	0.217	13
6	7.48	1.00	0.244	10

Durante cada riego se realizaron las mediciones iniciando con intervalos de 5 o 10 minutos. En cada intervalo de tiempo de medición, se marcó con un plumón el frente de avance de mojado sobre la pared de observación del cubo de acrílico (Figura 7). Posteriormente se midieron con una regla graduada el radio y la profundidad.



Figura 7. Mediciones al término del tercer riego.

Registro y generación de la geometría del frente húmedo

Se tomaron fotografías después de finalizar cada riego las cuales fueron procesadas en el software AutoCad 2019.

Evaluación del desempeño de los modelos matemáticos

El desempeño de los modelos matemáticos fue evaluado a partir de medidas de dispersión y asociación, las cuales fueron ecuaciones de error medio, raíz cuadrada del error cuadrático medio, eficiencia del modelo y coeficiente de determinación. Los modelos evaluados fueron: Amin y Ekhmaj (2006); Malek y Peters (2011); Al-Ogaidi *et al.* (2015); Cruz-Bautista *et al.* (2016) y Prado-Hernández *et al.* (2017).

Resultados y Análisis

Geometría del bulbo húmedo

Se realizó un análisis de cada riego, presentando cuadros y gráficas de los diámetros y profundidades medidas directamente en el bulbo húmedo en distintos intervalos de tiempo. Además de un análisis comparativo de la geometría del frente de humedecimiento en los seis riegos.

Geometría del bulbo húmedo en el primer riego

Se puede observar en la Figura 8 que el desplazamiento del agua ocurrió en primera instancia hacia la dirección horizontal, ampliando el diámetro más que la profundidad de mojado. Sin embargo, en la Figura 8 se observa que el avance horizontal y vertical del bulbo de mojado, incrementaron de manera similar después de la cuarta medición (1:20:00 H:M:S del primer riego).

Geometría del bulbo húmedo en el segundo riego

Se puede observar en la Figura 8 que al igual que en el primer riego, al inicio del riego el avance de humedecimiento avanzó más rápido en ambas direcciones (0:30:00 Horas:Minutos:Segundos del segundo riego). Al comparar el segundo riego con el primero, se puede apreciar un mayor avance en ambas direcciones en un menor tiempo, esto se debe a que se presentó una condición de humedad inicial mayor en el segundo riego. Por último, se aprecia que predominó el avance horizontal en la forma del bulbo.

Geometría del bulbo húmedo en el tercer riego

Se puede observar en la Figura 8 que al utilizar un caudal menor en comparación con los dos riegos anteriores, hubo un predominio en el avance vertical después de las primeras mediciones (0:45:00 H:M:S del tercer riego).

Geometría del bulbo húmedo en el cuarto riego

Se puede observar en la Figura 8 un avance similar en la forma del bulbo húmedo al del tercer riego, donde predominó el avance vertical, la diferencia es que se puede apreciar un mayor avance en ambas direcciones en un menor tiempo, esto se debe a que se presentó una condición de humedad inicial mayor en el cuarto riego, lo anterior parecido a la comparación entre el segundo y el primer riego.

Geometría del bulbo húmedo en el quinto riego

Al igual que en los anteriores riegos, al inicio del riego el avance de humedecimiento avanzó más rápido en ambas direcciones (0:15:00 H:M:S del quinto riego). Al aumentar el caudal del emisor hubo un mayor avance en ambas direcciones en un menor tiempo en comparación con los riegos anteriores, donde el incremento en la dirección horizontal fue más notorio (como se muestra en la figura 8).

Geometría del bulbo húmedo en el sexto riego

Este riego tuvo un comportamiento similar en la forma del bulbo al del quinto riego (Figura 8), donde predominó el avance horizontal, la diferencia es que se puede apreciar un mayor avance en ambas direcciones en un menor tiempo, esto se debe a que se presentó una condición de humedad inicial mayor en el sexto riego. Al comparar el sexto riego con todos los riegos anteriores se puede concluir que un aumento del caudal impacta en un mayor avance en ambas direcciones, pero principalmente al avance horizontal.

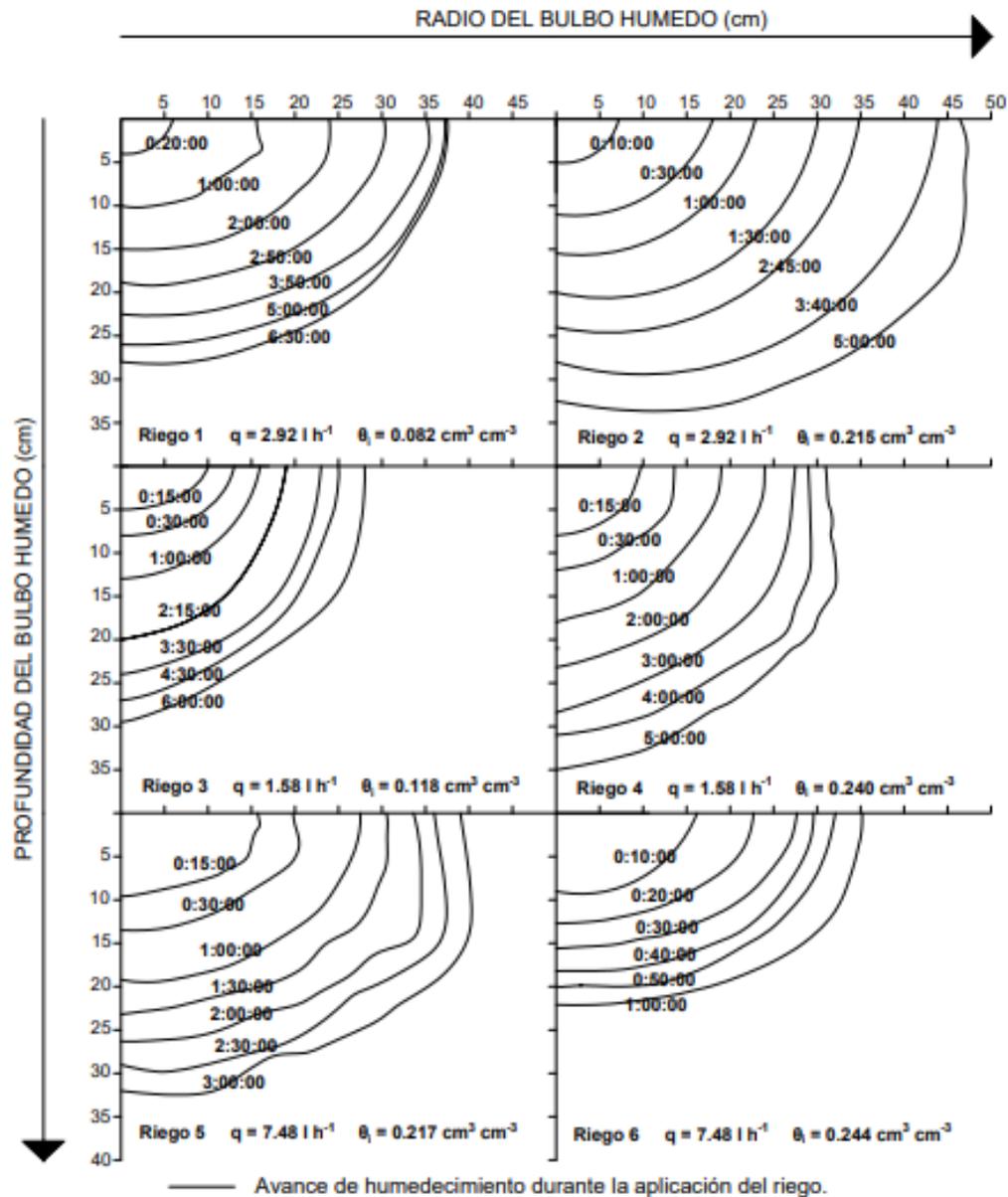


Figura 8. Geometría de los frentes de humedecimiento de los seis riegos.

Evaluación y representación gráfica de la evolución temporal del diámetro del bulbo húmedo

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 4, se aprecia en términos generales que el modelo con menor representatividad de los datos colectados en el presente estudio fue el de Malek & Peters (2011); el modelo de Cruz-Bautista et al. (2016) tuvo un buen desempeño para riegos con humedad inicial baja (riegos 1 y 3), pero su desempeño no fue bueno para los demás riegos; un caso similar es el modelo de Prado-Hernández et al. (2017) donde se tuvo un buen desempeño en caudales bajos (riegos 1-4), pero su desempeño no fue aceptable en los riegos de caudal de 7.48 L h⁻¹. El modelo de Al-Ogaidi et al. (2015) tuvo un desempeño aceptable para humedad inicial alta y caudal bajo (riegos

2 y 4), para los demás riegos su desempeño fue limitado. En general, el modelo de Amin & Ekhmaj (2006) fue el que presentó mejores resultados para las diversas condiciones de riego.

Lo anterior tiene sentido al revisar el Cuadro 1 donde se muestran los rangos de validez de cada uno de los modelos utilizados, un ejemplo es el modelo de Prado-Hernández et al. (2017) donde su rango de validez es entre 3 a 4 L h⁻¹, el caudal de 7.48 L h⁻¹ de los riegos 5 y 6 se alejó considerablemente del rango de validez. Otro ejemplo es el caso del modelo de Cruz-Bautista et al. (2016) donde la humedad inicial ronda entre los 0.05 y 0.11 cm³ cm⁻³, parecida a la de los riegos 1 y 3. En el caso de Malek & Peters (2011), el modelo se generó a partir de solo una textura de suelo, diferente a la textura del suelo que se utilizó en el experimento. Los modelos de Amin & Ekhmaj (2006) y Al-Ogaidi et al. (2015) tienen rangos de validez similares, la diferencia de los resultados se debió a las variables predictivas y a los coeficientes de ajuste utilizados en cada modelo.

En conclusión, el modelo de Amin & Ekhmaj (2006) fue el que mostró mayor constancia y mejor desempeño para estimar la dimensión horizontal del frente de humedecimiento para las diversas condiciones de riego. Los valores de ME oscilaron de -7.57 a 2.35 cm, los valores de RMSE resultaron entre 2.90 y 10.28 cm, los valores de R² oscilaron de 0.89 a 0.99. Según los valores de EF y los criterios de desempeño de Ritter & Muñoz-Carpena (2013), el modelo resultó de aceptable a muy bueno en la estimación del diámetro del bulbo húmedo (valores entre 0.73 a 0.96).

Cuadro 4. Medidas de dispersión y asociación de los modelos matemáticos evaluados para el diámetro.

Riego	Modelo	ME (cm)	RMSE (cm)	EF	R ²
1	Amin y Ekhmaj (2006)	-0.63	10.22	0.82	0.89
	Malek y Peters (2011)	-43.36	48.71	-3.10	0.96
	Al-Ogaidi et al. (2015)	13.98	16.35	0.54	0.88
	Cruz-Bautista et al. (2016)	4.20	7.66	0.90	0.95
	Prado et al. (2017)	-2.80	9.44	0.85	0.93
2	Amin y Ekhmaj (2006)	-12.66	17.67	0.56	0.94
	Malek y Peters (2011)	-52.32	57.93	-3.74	0.99
	Al-Ogaidi et al. (2015)	7.59	11.00	0.83	0.93
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-23.95	27.65	-0.08	0.98
	Prado et al. (2017)	-15.29	19.10	0.49	0.97
3	Amin y Ekhmaj (2006)	2.35	2.90	0.96	0.99
	Malek y Peters (2011)	-33.23	35.50	-5.58	0.98
	Al-Ogaidi et al. (2015)	16.30	17.01	-0.51	0.98
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-1.59	2.13	0.98	0.99
	Prado et al. (2017)	5.72	6.31	0.79	0.99
4	Amin y Ekhmaj (2006)	-1.89	5.78	0.89	0.97
	Malek y Peters (2011)	-31.84	35.87	-3.07	0.98
	Al-Ogaidi et al. (2015)	13.77	14.32	0.35	0.96

	Cruz-Bautista et al. (2016)	-13.20	15.35	0.25	0.98
	Prado et al. (2017)	-0.15	3.23	0.97	0.98
	Amin y Ekhmaj (2006)	-0.31	3.67	0.96	0.98
	Malek y Peters (2011)	-41.73	44.73	-5.05	0.99
5	Al-Ogaidi et al. (2015)	22.27	22.94	-0.59	0.97
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-11.76	12.70	0.51	1.00
	Prado et al. (2017)	-12.73	14.02	0.41	0.99
	Amin y Ekhmaj (2006)	-7.57	10.28	0.73	0.95
	Malek y Peters (2011)	-41.47	45.30	-4.27	0.99
6	Al-Ogaidi et al. (2015)	11.90	12.92	0.57	0.94
	Cruz-Bautista et al. (2016)	-19.60	21.86	-0.23	0.99
	Prado et al. (2017)	-18.59	20.97	-0.13	0.98

Evaluación y representación gráfica de la evolución temporal de la profundidad del bulbo húmedo

A partir de los resultados mostrados en el Cuadro 5 se aprecia en términos generales que el peor modelo para el caudal de 1.58 L h^{-1} fue el de Malek & Peters (2011); el modelo de Cruz-Bautista et al. (2016) tuvo un buen desempeño para riegos con caudal bajo (riegos 3 y 4), además de mejorar su desempeño en humedades iniciales bajas (comparaciones entre riegos 1 con 2 y 3 con 4). Para el modelo de Prado-Hernández et al. (2017) se tuvo un buen desempeño en caudales bajos (riegos 1-4), pero su desempeño no fue bueno en los riegos de caudal de 7.48 L h^{-1} . El modelo de Al-Ogaidi et al. (2015) tuvo un desempeño aceptable para algunos riegos (2,3,4 y 6) y mejoró su desempeño al incrementar la humedad inicial (comparaciones entre riegos 1 con 2, 3 con 4 y 5 con 6); el modelo de Amin & Ekhmaj (2006) fue el que presentó mejores resultados para las diversas condiciones de riego.

Al igual que en el caso del diámetro, lo anterior tiene sentido al revisar el Cuadro 1 donde se muestran los rangos de validez de cada uno de los modelos utilizados. Otro ejemplo es el caso del modelo de Malek & Peters (2011) donde su rango de validez es entre 2 a 6 L h^{-1} , el caudal de 1.58 L h^{-1} de los riegos 3 y 4 se encuentra fuera de este rango de validez. Las variaciones del desempeño predictivo entre cada uno de los modelos utilizados se pueden explicar principalmente: por los rangos de validez, por las variables predictivas y los coeficientes de ajuste utilizados.

En conclusión, el modelo de Amin & Ekhmaj (2006) fue el que mostró mayor constancia y mejor desempeño para estimar la dimensión vertical del frente de humedecimiento para las diversas condiciones de riego. Los valores de ME oscilaron de -4.09 a 0.59 cm , los valores de RMSE resultaron entre 2.48 y 5.12 cm , los valores de R^2 oscilaron de 0.96 a 0.99 . Según los valores de EF y los criterios de desempeño de Ritter & Muñoz-Carpena (2013), el modelo resultó de aceptable a muy bueno en la estimación del diámetro del bulbo húmedo (valores entre 0.66 a 0.91).

Cuadro 5. Medidas de dispersión y asociación de los modelos matemáticos evaluados para la profundidad.

Riego	Modelo	ME (cm)	RMSE (cm)	EF	R ²
1	Amin y Ekhmaj (2006)	0.59	2.48	0.91	0.96
	Malek y Peters (2011)	-0.83	1.87	0.95	0.99
	Al-Ogaidi et al. (2015)	9.79	10.15	-0.46	0.97
	Cruz-Bautista et al. (2016)	6.10	6.36	0.43	0.99
	Prado et al. (2017)	9.08	9.39	-0.25	0.94
2	Amin y Ekhmaj (2006)	-4.09	5.12	0.68	0.99
	Malek y Peters (2011)	-5.77	6.41	0.50	0.99
	Al-Ogaidi et al. (2015)	5.19	5.42	0.64	0.99
	Cruz-Bautista et al. (2016)	9.03	9.96	-0.21	0.99
	Prado et al. (2017)	3.71	3.93	0.81	0.98
3	Amin y Ekhmaj (2006)	-3.83	4.99	0.66	0.98
	Malek y Peters (2011)	-6.08	6.90	0.34	0.99
	Al-Ogaidi et al. (2015)	3.16	3.32	0.85	0.99
	Cruz-Bautista et al. (2016)	2.56	2.76	0.89	0.99
	Prado et al. (2017)	-0.70	2.52	0.91	0.97
4	Amin y Ekhmaj (2006)	-5.97	7.64	0.40	0.99
	Malek y Peters (2011)	-8.25	9.64	0.05	0.99
	Al-Ogaidi et al. (2015)	-0.06	1.63	0.97	0.99
	Cruz-Bautista et al. (2016)	3.01	3.40	0.88	1.00
	Prado et al. (2017)	-3.30	5.09	0.73	0.98
5	Amin y Ekhmaj (2006)	-1.89	2.93	0.86	0.98
	Malek y Peters (2011)	-2.98	3.33	0.82	1.00
	Al-Ogaidi et al. (2015)	8.20	8.58	-0.21	0.99
	Cruz-Bautista et al. (2016)	10.33	11.25	-1.08	1.00
	Prado et al. (2017)	14.79	15.41	-2.89	0.97
6	Amin y Ekhmaj (2006)	-2.24	2.90	0.78	0.98
	Malek y Peters (2011)	-3.85	4.29	0.51	1.00
	Al-Ogaidi et al. (2015)	5.18	5.46	0.21	0.99
	Cruz-Bautista et al. (2016)	6.59	7.12	-0.34	1.00
	Prado et al. (2017)	10.84	11.44	-2.47	0.97

Conclusiones

Se obtuvo la evolución temporal y espacial del frente de avance del bulbo de humedecimiento en un suelo franco arenoso en riego por goteo superficial, y se evaluaron algunos modelos matemáticos empíricos que estiman el diámetro y la profundidad del frente húmedo, a partir de las características del suelo, el tiempo de riego, el caudal del emisor y la humedad inicial.

Para la estimación del diámetro del frente húmedo, el modelo con mejor desempeño fue el de Amin & Ekhmaj (2006) y el de peor desempeño fue el de Malek y Peters (2011). Para la estimación de la profundidad del frente húmedo, el mejor modelo fue el de Amin & Ekhmaj (2006) y los menos acertados fueron los modelos de Malek y Peters (2011), Cruz-Bautista et al. (2016) y Prado-Hernández et al. (2017) para los caudales de 1.58, 2.92 y 7.48 L h⁻¹, respectivamente. Las variaciones del desempeño predictivo entre cada uno de los modelos utilizados se pueden explicar principalmente por los rangos de validez, por las variables predictivas y los coeficientes de ajuste utilizados.

Se obtuvo gráficamente el comportamiento temporal de la geometría del frente de humedecimiento. Al incrementar el caudal se aumentan los avances vertical y horizontal, pero siendo más evidente el efecto en la dirección horizontal. Para el caso del contenido de humedad inicial en el suelo, se observó que, a mayor contenido de humedad inicial, mayor es el avance de humedecimiento en ambas direcciones en tiempos iguales, manteniendo de cierta manera la forma del bulbo húmedo para riegos con mismos caudales y diferentes humedades iniciales.

En conclusión, el modelo de Amin & Ekhmaj (2006) fue el que mostró mayor constancia y mejor desempeño para estimar las dimensiones horizontal y vertical del frente de humedecimiento para las diversas condiciones de riego. Según los valores de EF y los criterios de desempeño de Ritter & Muñoz-Carpena (2013), el modelo de Amin & Ekhmaj (2006) resultó de aceptable a muy bueno en la estimación del diámetro y profundidad del bulbo húmedo en un suelo de textura franco arenosa (valores entre 0.66 a 0.96).

Referencias Bibliográficas

- Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Kamal, M. R., & Abdullah, A. F. (2015). A modified empirical model for estimating the wetted zone dimensions under drip irrigation. *Jurnal Teknologi*, 76(15). DOI: 10.11113/jt.v76.5954
- Al-Ogaidi, A. A., Wayayok, A., Rowshon, M. K., & Abdullah, A. F. (2016). Wetting patterns estimation under drip irrigation systems using an enhanced empirical model. *Agricultural Water Management*, 176, 203-213. DOI: 10.1016/j.agwat.2016.06.002
- Amin, M. S., & Ekhmaj, A. I. (2006). DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In 7th International micro irrigation congress (Vol. 1016).
- Bresler, E., Heller, J., Diner, N., Ben-Asher, I., Brandt, A., & Goldberg, D. (1971). Infiltration from a trickle source: II. Experimental data and theoretical predictions. *Soil Science Society of America Journal*, 35(5), 683-689. DOI: 10.2136/sssaj1971.03615995003500050019x
- Cristóbal-Muñoz, I. (2022). Modelación de la geometría del bulbo de mojado en riego por goteo superficial. Tesis de Maestría, Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso

- Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México.
<https://repositorio.chapingo.edu.mx/handle/123456789/1722>
- Cristóbal-Muñoz, I., Prado-Hernández, J. V., Martínez-Ruiz, A., Pascual-Ramírez, F., Cristóbal-Acevedo, D., & Cristóbal-Muñoz, D. (2022). An Improved Empirical Model for Estimating the Geometry of the Soil Wetting Front with Surface Drip Irrigation. *Water*, 14(11), 1827. DOI: 10.3390/w14111827
- Cruz-Bautista, F., Zermeño-González, A., Álvarez-Reyna, V., Cano-Ríos, P., Rivera-González, M., & Siller-González, M. (2016). Validación de un modelo para estimar la extensión del bulbo de humedecimiento del suelo con riego por goteo. *Tecnología y ciencias del agua*, 7(1), 45-55.
- Gandullo, G.J.M. (1994). *Climatología y Ciencia del Suelo*. Segunda edición. Editorial Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid. 217-233.
- Labrador, M.J. (1992). *La materia orgánica en los agrosistemas*. Segunda edición. Ministerio de agricultura pesca y alimentación. México, D.F. 9 – 49.
- López, J. R., Hernández, A. J. M., Pérez, R. A., & González, H. J. F. (1992). *Riego Localizado*. Editorial Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Malek, K., & Peters, R. T. (2011). Wetting pattern models for drip irrigation: new empirical model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 137(8), 530-536. DOI: 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000320
- Martínez, E. R. (1991) *Riego localizado*. Primera edición. Universidad Autónoma Chapingo. México. 24-30.
- Ojeda, B.W. (1984). Consideraciones sobre la infiltración del agua en el suelo. Tesis profesional. Departamento de Irrigación. Chapingo, México: 7 – 39.
- Ortiz-Villavicencio, A. R. (2022). Medición y análisis de la geometría del frente de humedecimiento en riego por goteo superficial en un suelo arcilloso. Tesis de licenciatura, Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, México.
- Prado-Hernández, J. V., Ismene, G. R. M., Mota, L. A., Carrillo, M., Peña, V. M., Lugo, V. H., & Gerardo, V. P. O. (2017). Modelo empírico del patrón de humedad en un suelo orgánico de México con riego por goteo superficial. V Jornadas de Ingeniería del Agua. 24-26 de octubre. A Coruña. 229-236.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5), 318-333. DOI: 10.1063/1.1745010
- Subbauah, R., & Mashru, H. H. (2013). Modeling for predicting soil wetting radius under point source surface trickle irrigation. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15(3), 1-10.
- Zazueta, F. S., Clark, G. A., Smajstrla, A. G., & Carrillo, M. (1995). A simple equation to estimate soil-water movement from a drip irrigation source. Conserving resource/Preserving the environment. In *Proceedings of the Fifth International Microirrigation Congress, ASAE* (pp. 581-856).