

MEDICIÓN DE LA GEOMETRÍA DEL BULBO HÚMEDO EN RIEGO POR GOTEO CON MODELOS FÍSICOS DE PAREDES TRANSPARENTES

Irouri Cristóbal-Muñoz^{1*}; Jorge Víctor Prado-Hernández²; Emilio Quintana-Molina³; David Cristóbal-Acevedo²; Yasunari Cristóbal-Muñoz⁴.

¹Posgrado 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 - 5959521500 Exts. 1551 (*Autor de correspondencia)

²Departamento de Suelos. Universidad Autónoma Chapingo. C.P. 56230.

³Hydrosat. 9 Rue du Laboratoire, L-1911, Luxembourg, Luxembourg.

⁴Centro Regional de Formación Docente e Investigación Educativa, Axapusco, México. C.P. 55940.

Resumen

Existe una constante demanda a nivel mundial de producir una mayor cantidad de alimentos, pero con un menor consumo de agua y reduciendo el impacto ecológico en el proceso; el riego por goteo es una excelente opción para enfrentar esta problemática. Para aprovechar el potencial que ofrece la tecnología de riego por goteo se requiere optimizar su diseño y operación, a partir de información experimental sin alteraciones y confiable. Por este motivo, el objetivo de esta investigación fue comprobar la eficacia de los modelos físicos de paredes transparentes en la medición de la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, a partir de pruebas experimentales en laboratorio con distintas condiciones de riego y suelo. Utilizando diferentes texturas de suelo (franco arcillo arenosa, arcillosa y franco arenosa), caudales de riego (1.5, 2.9, 3.9 y 7.8 litros por hora), tiempos de riego (desde 15 minutos hasta 10 horas), tipos de riego (primer riego y riegos de reposición), densidades aparentes ($1.23\text{--}1.40\text{ g cm}^{-3}$), conductividades hidráulicas ($0.49\text{--}3.95\text{ cm h}^{-1}$), contenidos de humedad inicial en el suelo (PMP-CC) y contenidos de materia orgánica (0.38-5.32%). Se logró comprobar la eficacia de los modelos físicos de paredes transparentes en la medición de la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, siendo estos una excelente opción siempre que se tenga cuidado en la instalación del suelo dentro del modelo físico de paredes transparentes y al momento de realizar el riego.

Palabras claves: Agua en el suelo, frente de humedecimiento, 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%. 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% (Martínez-Austria, 2013). La tecnología de riego por goteo puede ser una excelente opción para enfrentar esta problemática, debido a su alta eficiencia, optimización de la aplicación de fertilizantes, aumento del rendimiento y calidad de los cultivos, entre otros beneficios (Shock & Welch, 2013).

Subbaiah (2013) menciona que la técnica de aplicación del riego por goteo ha sido estudiada y empleada en muchos lugares del mundo, para optimizar los beneficios que ofrece esta forma de aplicación del riego son necesarios diferentes conocimientos y experiencias. Con esta técnica, el agua se conduce hasta la planta y es entregada puntualmente al suelo con emisores de baja presión, minimizando las pérdidas por conducción y anulando las pérdidas por coleos y con potencial de minimizar las pérdidas por percolación profunda y evaporación (Camp, 1998).

En tiempos recientes se han visto grandes avances en el diseño, tecnología y operación de los sistemas de riego por goteo, esto se debe mayormente a una mejor comprensión del movimiento del agua en el suelo (Ainechee et al., 2009). La geometría del bulbo húmedo en el suelo es uno de los aspectos con mayor importancia a considerar en el diseño y operación del riego por goteo (Moncef et al., 2002), pues con dicha información se puede determinar el espaciamiento óptimo entre emisores para cubrir el sistema radicular de la planta, entre otras aplicaciones (Skaggs et al., 2004).

El conocimiento de la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo permite ubicar adecuadamente el emisor o emisores, logrando que la planta pueda consumir agua y nutrientes de una manera eficiente, con menores costos por labores culturales y mayores ingresos por el aumento del rendimiento (Amin & Ekhmaj, 2006; Skaggs et al., 2010). Para diseño y operación de sistemas de riego por goteo, la geometría del bulbo húmedo puede ser definida de una manera práctica por su ancho en la superficie del suelo y su profundidad (Al-Ogaidi et al., 2015).

La distribución del agua del bulbo húmedo generado por un emisor se puede obtener por tres medios: a través de mediciones en experimentos in situ, con mediciones en modelos físico experimentales en laboratorio, y con el uso de modelos matemáticos (Cruz-Bautista et al., 2016). Los modelos matemáticos se pueden clasificar en tres grupos principales: numéricos, analíticos y empíricos (Kandelous & Šimůnek, 2010). En cualesquiera de los modelos matemáticos, es indispensable su evaluación para conocer su alcances y limitaciones.

Para aprovechar el potencial que ofrece la tecnología de riego por goteo se requiere optimizar su diseño y operación, a partir de información experimental sin alteraciones y confiable, por

esta razón algunos investigadores han realizado experimentos de riego por goteo en ambientes controlados con resultados satisfactorios, a partir de modelos físicos con paredes transparentes, logrando observar los patrones de humedecimiento de un sistema de riego de fuente puntual, en tiempo real y sin alterar físicamente el suelo durante las mediciones. Sin embargo, en muchos estudios ciertos factores son ignorados y algunos detalles metodológicos no están reportados o no se especifican (Cristóbal-Muñoz et al., 2022), comprometiendo la reproducibilidad de la metodología y la veracidad de los resultados.

Por este motivo, el objetivo de esta investigación fue comprobar la eficacia de los modelos físicos de paredes transparentes en la medición de la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, a partir de pruebas experimentales en laboratorio con distintas condiciones de riego y suelo.

Materiales y Métodos

Se entiende como eficacia la capacidad de lograr el efecto que se desea o espera. Se utilizó la metodología de Kandelous & Šimůnek (2010) adaptada por Cristóbal-Muñoz (2022), En términos generales la metodología consistió en colocar suelos con un tratamiento previo en prismas rectangulares de acrílico cristal (100x100x95 y 60x40x35 cm), con sensores de humedad instalados en forma de cuadrícula y el emisor de riego se ubicó sobre la superficie del suelo. cerca de una de las paredes de los prismas rectangulares con el objetivo de observar la geometría del bulbo húmedo (Figura 1). Durante el transcurso de cinco años se utilizaron diferentes texturas de suelo (franco arcillo arenosa, arcillosa y franco arenosa), caudales de riego (1.5, 2.9, 3.9 y 7.8 lph), tiempos de riego (desde 15 minutos hasta 10 horas), tipos de riego (primer riego y riegos de reposición), densidades aparentes (1.23–1.40 g cm⁻³), conductividades hidráulicas (0.49–3.95 cm h⁻¹), contenidos de humedad inicial en el suelo (PMP–CC) y contenidos de materia orgánica (0.38–5.32%).

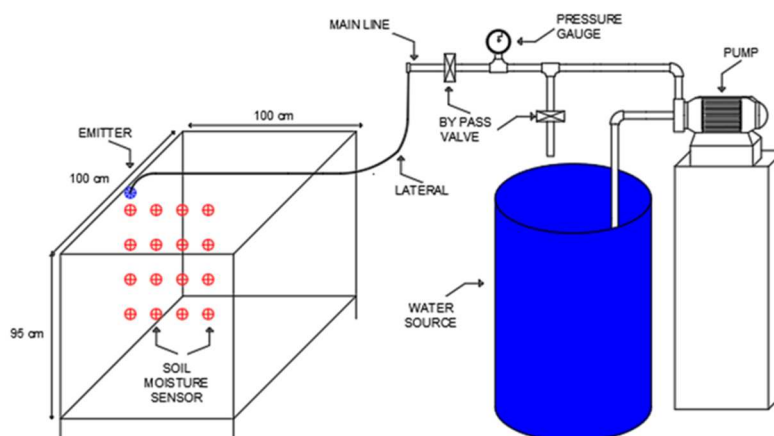


Figura 1. Sistema experimental. Fuente: Cristóbal-Muñoz et al. (2022).

La eficacia del método de modelos físicos de paredes transparentes se comprobó a partir de la comparación entre los resultados obtenidos y lo reportado por otros autores en experimentos de campo (Cruz-Bautista et al., 2016; Kandelous & Šimůnek, 2010; Malek & Peters, 2011).

También se probaron distintas propuestas, de nuestra autoría y de diversos autores, en los procesos de preparación y empaque de los suelos, medición de la geometría del bulbo húmedo y análisis de la información. Estos aspectos se especifican a mayor detalle en el apartado de resultados.

Resultados y Discusión

La mejor opción para secar suelo previo a introducirlo dentro de un modelo físico de paredes transparentes, fue por medio de un invernadero. Esto se debe a los volúmenes de suelo que se pueden trabajar en invernadero son mayores en comparación a los utilizados en otros métodos de secado. Por ejemplo, el uso de un ventilador en laboratorio como se observa en la Figura 2.

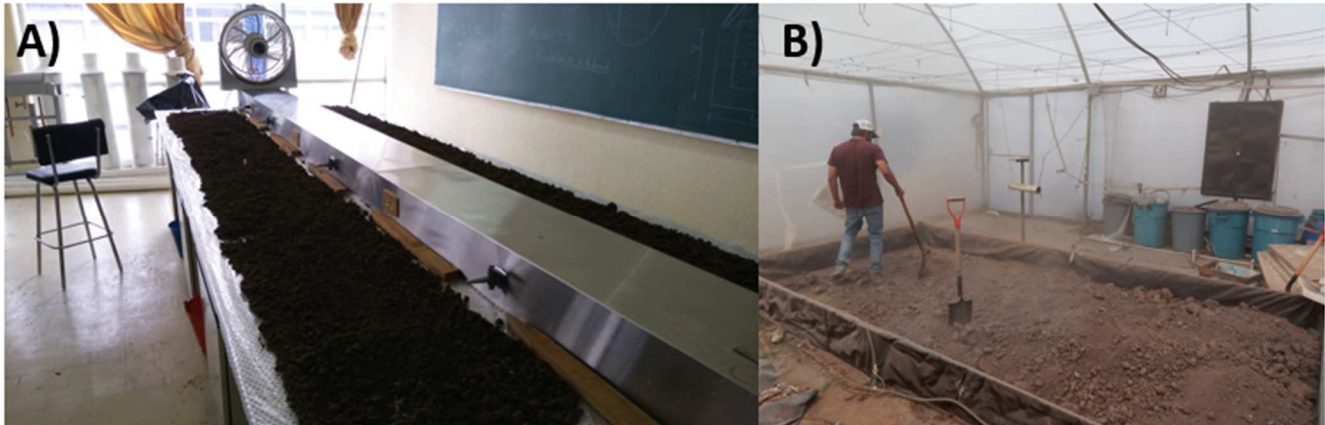


Figura 2. Proceso de secado del suelo. A) En laboratorio y B) En invernadero.

La relación costo-beneficio de utilizar modelos físicos de paredes transparentes en la medición de la geometría del bulbo húmedo (Figura 3), fue buena. Aun cuando la inversión inicial fue elevada los beneficios obtenidos fueron mayores, debido al ahorro de recursos en comparación de realizar las mediciones en campo, ya que se optimiza el tiempo y los materiales utilizados, por causa de la reducción del efecto de variables externas en las mediciones.



Figura 3. Mediciones de la geometría del bulbo húmedo en modelos físicos de paredes transparentes.

Lo anterior fue similar a lo obtenido por Júnior et al. (2016), donde en diversos métodos para obtener los patrones de humedecimiento, el método que obtuvo mejores resultados fue el que tuvo menor interferencia de variables externas. Por lo tanto, los modelos físicos de paredes transparentes son una excelente opción.

Dos aspectos en tener en consideración al utilizar este método, fueron la textura y el color del suelo, ya que dependiendo del caso se debe tener ciertos cuidados al momento de realizar las mediciones, por ejemplo, en los suelos de color claro fue más fácil visualizar el avance de humedecimiento en comparación de los suelos de color oscuro (Figura 4).

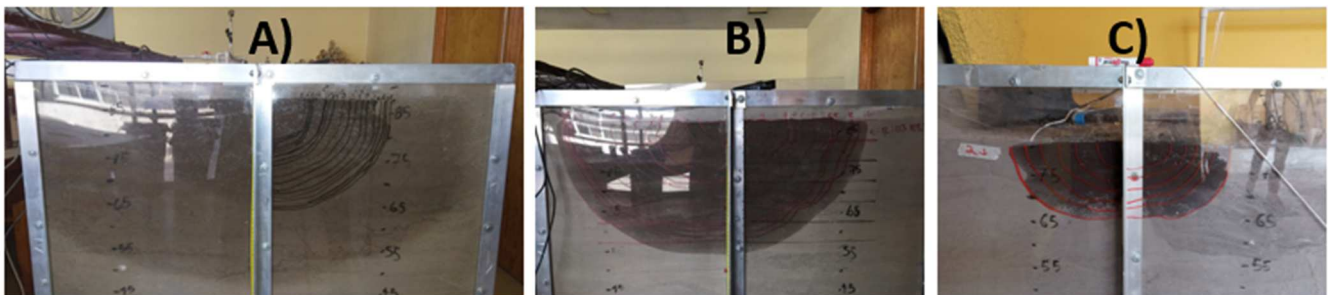


Figura 4. Texturas de suelo utilizadas. A) Franco arcillo arenosa, B) Franco arenosa y C) Arcillosa.

En el caso del suelo arcilloso donde las variaciones del contenido de humedad provocaron una mayor variación en el volumen de suelo en comparación a otras texturas, causando un flujo preferencial en las paredes de acrílico cristal si no se tiene cuidado en su operación. Llique & Guerrero (2014) afirman que este comportamiento es esperado, ya que el suelo arcilloso compactado ha sido estudiado en múltiples estudios con el fin de caracterizar su comportamiento volumétrico en diferentes condiciones de humedad, utilizando este conocimiento más en temas de construcción.

En las pruebas experimentales para la preparación del suelo se utilizó un tamiz de mayor abertura que el utilizado por Ainechee et al. (2009) y Al-Ogaidi et al. (2016), con el fin de conseguir condiciones similares a las encontradas en campo después de un barbecho, ya que en condiciones reales es muy difícil encontrar un suelo agrícola que no contenga agregados superiores a 2 mm de diámetro (Kirkby et al., 2021; Nagaraja et al., 2016).

Kandelous & Šimůnek (2010) aconsejan aplicar un tratamiento de pegamento y arena en las paredes de observación de los modelos físicos de paredes transparentes, lo anterior con el objetivo de prevenir el flujo preferencial. Con base en nuestra experiencia, esta recomendación trajo consigo un beneficio extra, ya que en los suelos de color oscuro se facilitó la observación del frente de humedecimiento. Sin embargo, se debe tener cuidado al utilizar un suelo donde hay variaciones considerables de volumen dependiendo de su contenido de humedad, ya que esta capa puede ser perjudicial en las mediciones de los riegos de reposición.

Si se desea utilizar una cámara y fotografías para realizar la digitalización de las mediciones de la geometría del bulbo húmedo, es deseable que las personas encargadas de ello y del procesamiento de la información cuenten con experiencia en fotogrametría o visión artificial.

Conclusiones

Se logró comprobar la eficacia de los modelos físicos de paredes transparentes en la medición de la geometría del bulbo húmedo en riego por goteo, siendo estos una excelente opción siempre que se tenga cuidado en la instalación del suelo dentro del modelo físico de paredes transparentes y al momento de realizar el riego. Al cumplirse lo mencionado anteriormente se asegura que se obtendrá información experimental sin alteraciones y confiable.

Referencias Bibliográficas

- Ainechee, G., Boroomand-Nasab, S., & Behzad, M. (2009). Simulation of soil wetting pattern under point source trickle irrigation. *Journal of Applied Sciences*, 9(6), 1170-1174. DOI: 10.3923/jas.2009.1170.1174
- 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
- Amin, M. S., & Ekhmaj, A. I. (2006). DIPAC-drip irrigation water distribution pattern calculator. In 7th International micro irrigation congress (Vol. 1016).
- Camp, C. R. (1998). Subsurface drip irrigation: A review. *Transactions of the ASAE*, 41(5), 1353. DOI: 10.13031/2013.17309
- 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.
- Kandelous, M. M., & Šimůnek, J. (2010). Comparison of numerical, analytical, and empirical models to estimate wetting patterns for surface and subsurface drip irrigation. *Irrigation Science*, 28(5), 435-444. DOI: 10.1007/s00271-009-0205-9
- Kirkby, C. A., Kirkegaard, J. A., & Richardson, A. E. (2021). Gravel-associated organic material is important to quantify soil carbon and nitrogen stocks to depth in an agricultural cropping soil. *Soil Research*, 60(3), 224-233.
- Llique, R., & Guerrero, A. (2014). Influencia de la humedad de compactación en el comportamiento volumétrico de los suelos arcillosos. *Revista CIENCIA Y TECNOLOGÍA*, 10(4), 9-21.
- 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-Austria, P. F. (2013). Los retos de la seguridad hídrica. *Tecnología y ciencias del agua*, 4(5), 165-180.

- Moncef, H., Hedi, D., Jelloul, B., & Mohamed, M. (2002). Approach for predicting the wetting front depth beneath a surface point source: theory and numerical aspect. *Irrigation and Drainage: The Journal of the International Commission on Irrigation and Drainage*, 51(4), 347-360. DOI: 10.1002/ird.60
- Nagaraja, M. S., Bhardwaj, A. K., Reddy, G. V., Srinivasamurthy, C. A., & Kumar, S. (2016). Estimations of soil fertility in physically degraded agricultural soils through selective accounting of fine earth and gravel fractions. *Solid Earth*, 7(3), 897-903.
- Shock, C. C., & Welch, T. (2013). El riego por goteo: Una introducción. *Técnicas para la Agricultura Sostenible*, EM 8782-S, 1-9.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., Šimůnek, J., & Shouse, P. J. (2004). Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 130(4), 304-310.
- Skaggs, T. H., Trout, T. J., & Rothfuss, Y. (2010). Drip irrigation water distribution patterns: effects of emitter rate, pulsing, and antecedent water. *Soil Science Society of America Journal*, 74(6), 1886-1896.
- Subbaiah, R. (2013). A review of models for predicting soil water dynamics during trickle irrigation. *Irrigation Science*, 31(3), 225-258.