

**BUAP**Facultad de Ciencias
Agrícolas y Pecuarias

Artículo: COMEII-22033

**VII CONGRESO NACIONAL DE RIEGO,
DRENAJE Y BIOSISTEMAS***Teziutlán, Puebla., del 23 al 26 de noviembre de 2022***EL USO DEL MODELO HYDRUS-2D PARA SIMULAR LA
DISTRIBUCIÓN DE LA HUMEDAD DEL SUELO****Rocío Guadalupe Reyes Esteves^{1*}**¹Northwest Research-Extension Center. Kansas State University. 105 Experiment Farm Drive, Colby, Kansas 67701.

rocior@ksu.edu →+1 (520) 658 – 7217 (*Autor de correspondencia)

Resumen

El riego por goteo subterráneo (RGS) es un sistema de riego eficiente para la producción de cultivos. Aprovechar todo el potencial de la tecnología del RGS requiere optimizar los parámetros de su diseño y manejo. Una mejor comprensión de la progresión y redistribución de la humedad en el suelo alrededor de una fuente puntual enterrada puede aumentar la productividad del agua y en consecuencia el éxito de un sistema de RGS. Las simulaciones numéricas son un enfoque rápido y económico para estudiar prácticas óptimas de diseño y manejo. En este estudio, se utilizó el modelo de simulación HYDRUS-2D para comparar los datos del contenido de humedad volumétrico en un perfil de suelo simulado y en el sitio de estudio, para el cultivo de alfalfa en un suelo franco limoso a una profundidad de 2.4 m, en Colby, Kansas EE. UU. Los resultados refuerzan el uso del modelo HYDRUS-2D como herramienta eficaz para investigar el diseño y prácticas de manejo de sistemas de RGS para la alfalfa, un cultivo conocido por sus altos requerimientos de agua y rentabilidad.

Palabras claves: HYDRUS-2D, riego por goteo subterráneo, contenido de agua del suelo, modelado, simulación.

Introducción

El riego por goteo subterráneo (RGS) se describe como la aplicación de agua debajo de la superficie del suelo a través de emisores con tasas de descarga generalmente en el mismo rango que el riego por goteo superficial (ASAE 2005). El RGS es una tecnología de riego conocida por sus altas eficiencias de aplicación, superiores a sistemas de riego por aspersión y gravedad. Un sistema de RGS manejado adecuadamente humedece la zona de raíces de manera uniforme en todo el perfil del suelo mientras mantiene una superficie de suelo seca (Lamm *et al.*, 2012). Con ello se reducen las pérdidas de agua por evaporación, el crecimiento de malezas y se elimina la percolación profunda. Un sistema de RGS diseñado apropiadamente permite valores de eficiencia en el uso del agua superiores al 95% (Payero 2002); por tanto, más del 95% del agua suministrada, retenida en la zona radicular, tiene un uso beneficioso para los cultivos. Además de todas estas ventajas, el RGS minimiza el contacto directo entre el agua y las plantas, evitando riesgos sanitarios por el uso de agua contaminada (Reyes-Esteves *et al.*, 2022).

La alfalfa (*Medicago sativa* L.) es un cultivo forrajero con grandes necesidades de agua debido a su larga temporada de crecimiento, por lo que los sistemas de riego altamente eficientes, como el RGS, reducen la demanda total de agua de riego al minimizar las pérdidas no beneficiosas. De acuerdo con la ubicación de determinado cultivo, la distribución de agua de riego puede verse restringida por condiciones hidrogeológicas o sociales (Alam *et al.*, 2002), por lo que el RGS puede aumentar la producción de alfalfa al incrementar su transpiración mientras elimina o reduce la escorrentía, la percolación profunda y la evaporación en el suelo (Lamm *et al.*, 2012). Los requerimientos de riego para la alfalfa son grandes; en consecuencia, el riego debe utilizarse de manera eficiente en la región de las Grandes Llanuras (Great Plains) de los Estados Unidos, donde el agua a menudo proviene del acuífero Ogallala (Lamm *et al.*, 2012). Una ventaja significativa del RGS en la alfalfa es la capacidad de continuar regando inmediatamente antes, durante, e inmediatamente después de las múltiples cosechas de alfalfa (Lamm, 2016). Un sistema de RGS proporciona uniformidades de distribución del 92 % (Sanden *et al.*, 2011) durante la temporada de crecimiento, lo que reduce el estrés hídrico y provoca un rápido crecimiento y mayores rendimientos (Putnam *et al.*, 2001). Se ha reportado que el rendimiento con RGS es aproximadamente del 22 % (Hutmacher *et al.*, 2001) al 25 % (Godoy *et al.*, 2003) mayor que el de la alfalfa regada con riego por gravedad. Alam *et al.* (2002) reportó que un sistema de RGS bien diseñado puede reducir potencialmente el volumen de agua aplicada en aproximadamente un 22 % y mejorar el rendimiento en un 7 % en comparación con un sistema de pivote central. El RGS reduce la aparición de malezas y da como resultado un sistema radicular más saludable que reduce el estrés fisiológico de la planta. El RGS también puede aumentar la producción de forraje, que suele estar linealmente relacionada con la transpiración (Lamm *et al.*, 2012; Alam *et al.*, 2002; Hutmacher *et al.*, 2001).

Comprender todo el potencial que ofrece un sistema de RGS requiere mejorar los parámetros de su diseño y manejo, tales como la frecuencia y la duración del riego, la descarga del emisor, la profundidad de instalación de la cinta de goteo, entre otros. Una simulación numérica es un enfoque eficiente para investigar las prácticas óptimas de

manejo del riego por goteo (Cote *et al.*, 2003; Schmitz *et al.*, 2002; Meshkat *et al.*, 1999). Los modelos de simulación permiten estudiar los procesos físicos que gobiernan el flujo de agua en la zona radicular de un suelo no saturado y, en consecuencia, evaluar la forma y la dimensión de los patrones de mojado en función de la cantidad de agua aplicada. Conocer las dimensiones del volumen de humedad en función del tiempo para un tipo de suelo determinado ayuda a identificar los parámetros de diseño adecuados (separación entre emisores, profundidad de instalación, distancia entre cintas de goteo, etc.) y la duración del riego (Provenzano, 2007). Numerosos investigadores se han interesado en utilizar modelos que simulan el flujo de agua y el transporte de solutos en los suelos para evaluar el movimiento de agua en suelos con RGS, demostrando que las simulaciones numéricas concuerdan con los datos de campo (Provenzano, 2007; Skaggs *et al.*, 2004). El uso de modelos de simulación contribuye a desarrollar escenarios y estrategias de gestión para el riego. Para validar la precisión de un modelo, es necesario calibrar el modelo utilizando medidas experimentales (Provenzano, 2007).

HYDRUS 2D/3D es un conocido software para Windows que simula el movimiento de agua, calor y solutos en medios porosos de saturación variable en dos y tres dimensiones. El código HYDRUS-2D (Simunek *et al.*, 1999) simula el proceso de infiltración resolviendo numéricamente la ecuación de Richard y se puede utilizar para modelar el flujo simétrico alrededor de una superficie esférica o una fuente puntual enterrada, tal como los emisores en la cinta de goteo. La literatura respalda el uso de HYDRUS 2D/3D como herramienta para la investigación de la ingeniería de riego y las prácticas de diseño y manejo (Reyes-Esteves y Slack, 2019; Provenzano, 2007). El riego por goteo y el modelado de sistemas de RGS han sido aplicaciones populares de HYDRUS 2D/3D (Simunek *et al.*, 2016).

El agua que fluye de un emisor subterráneo se mueve vertical y lateralmente en el suelo y humedece una parte del perfil del suelo. Conocer esta dinámica representa un requisito previo para diseñar sistemas de RGS y gestionar el uso del agua (Akbar *et al.*, 1996; Zur 1996). La forma y las dimensiones del patrón de mojado alrededor de una fuente enterrada dependen del condición inicial o antecedente del agua en el suelo, la descarga del emisor, el volumen de agua aplicado y el tipo de suelo. Para un suelo determinado, conocer la evolución temporal del volumen de mojado puede contribuir a establecer la profundidad de instalación adecuada y el espaciamiento entre las cintas de goteo (Reyes-Esteves y Slack, 2019) y la duración del evento de riego en función del volumen de suelo donde se encuentran las raíces.

Varios investigadores han evaluado la capacidad del modelo HYDRUS-2D para simular el movimiento del agua con RGS (Šimunek *et al.*, 2008). Por ejemplo, Skaggs *et al.* (2004) compararon simulaciones de HYDRUS-2D con datos de campo observados en un suelo franco arenoso a una profundidad de instalación de 6 cm y tres caudales de descarga. Skaggs *et al.* (2004) encontraron muy buena concordancia entre los datos simulados y observados. Provenzano (2007) evaluó la precisión de HYDRUS-2D comparando resultados de simulación y mediciones experimentales de potencial mátrico para RGS en un suelo franco arenoso con una profundidad de instalación de 10 cm y también encontró una concordancia bastante aceptable. Ben-Gal *et al.* (2004) encontraron una concordancia satisfactoria entre los datos observados y simulados. HYDRUS-2D también

se ha utilizado para validar varios modelos analíticos y empíricos para estimar la extensión del patrón de mojado en el tiempo, lo que ayuda a diseñar y operar sistemas de riego por goteo (Hinnell *et al.*, 2010; Kandelous y Simunek, 2010; Lazarovitch *et al.*, 2009; Warrick y Lazarovitch, 2007; Cook *et al.*, 2006). El modelo se ha utilizado con diferentes condiciones iniciales de contenido de agua en el suelo para determinar las dimensiones principales (horizontal y vertical) del volumen de mojado que rodea al emisor para ayudar en el diseño y manejo de un sistema de RGS (Reyes-Esteves y Slack, 2019).

Por lo tanto, el objetivo principal de este estudio es investigar la capacidad del modelo HYDRUS-2D para simular el movimiento y la redistribución del agua en un suelo bajo RGS para el cultivo de la alfalfa. Se llevo a cabo la calibración y validación del modelo por medio de comparación y análisis estadístico de los resultados simulados y datos observados del contenido de humedad volumétrico a una profundidad de 2.4 m. verificando con ello la idoneidad del modelo HYDRUS-2D para evaluar el contenido de humedad en el suelo en un suelo franco limoso en Colby, Kansas EE. UU.

Materiales y Métodos

Sitio de Estudio

Este estudio de modelado con HYDRUS-2D simuló un sistema de RGS utilizado para la producción de alfalfa en la Kansas State University - Northwest Research-Extension Center (KSU-NWREC), localizado en Colby, Kansas, EE. UU., con datos meteorológicos del año 2021. El suelo es clasificado como franco limoso profundo. El clima es semiárido con un patrón de precipitaciones de verano y una precipitación media anual de aproximadamente 480 mm. La precipitación promedio es de aproximadamente 400 mm de abril a octubre, el período típico de crecimiento de la alfalfa. La latitud y longitud son 39.39° N y 101.05° O, con una elevación de 963 m sobre el nivel del mar (Lamm *et al.*, 2012).

Diseño del Sistema de RGS y Manejo del Agua de Riego

El calendario de riego utilizado en este estudio se realizó semanalmente durante la temporada de crecimiento de la alfalfa durante el año 2021 utilizando datos recopilados de la estación meteorológica perteneciente a la NOAA (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los EE. UU.) situada aproximadamente a 500 m al noreste del campo de estudio. El calendario de riego (Cuadro 1) fue diseñado para aplicar el 100% de la evapotranspiración del cultivo que no fue proporcionada por la precipitación hasta la primera cosecha y después se aplicó el 85% de la evapotranspiración para el resto de la temporada. En la simulación se utilizaron riegos semanales o quincenales (un total de 23). La lamina bruta de riego osciló entre 7.62 y 63.50 mm durante toda la temporada. El contenido volumétrico de agua del suelo se midió (tres replicas) nueve veces espaciadas durante la temporada cultivo, con una sonda de neutrones en incrementos de 0.3 m hasta

una profundidad de 2.4 m, a una distancia de 0.75 m horizontalmente de la cinta de goteo (cuadro 2).

Cuadro 1. Calendario de riego 2021 para la producción de alfalfa con RGS, KSU-NWREC, Colby, Kansas, EE. UU.

Riego #	Riego (mm)	Fecha	Riego #	Riego (mm)	Fecha
1	54.61	12/4/2021	13	22.86	16/8/2021
2	30.48	27/4/2021	14	19.05	19/8/2021
3	63.50	12/6/2021	15	24.13	23/8/2021
4	25.40	19/6/2021	16	7.62	28/8/2021
5	25.40	29/6/2021	17	17.78	31/8/2021
6	25.40	18/7/2021	18	12.70	10/9/2021
7	25.40	22/7/2021	19	25.4	17/9/2021
8	25.40	26/7/2021	20	25.4	20/9/2021
9	20.32	29/7/2021	21	16.51	24/9/2021
10	12.70	1/8/2021	22	17.78	27/9/2021
11	10.16	4/8/2021	23	25.40	08/10/2021
12	13.97	10/8/2021			

Cuadro 2. Fechas de la lectura del contenido de humedad con la sonda de neutrones para la producción de alfalfa de 2021 con RGS, KSU-NWREC, Colby, Kansas, EE. UU.

Lectura #	Fecha
1	1/4/2021
2	8/6/2021
3	24/6/2021
4	6/7/2021
5	26/7/2021
6	2/8/2021
7	18/8/2021
8	31/8/2021

Modelado Numérico con HYDRUS-2D

Se utilizó el módulo bidimensional del software HYDRUS 2D/3D versión 2.x para simular el movimiento del agua del suelo para el sistema de RGS en alfalfa. En las simulaciones se utilizó información sobre el sitio de estudio, el clima, el diseño y el manejo del riego. HYDRUS 2D/3D simuló el flujo de agua del suelo y calculó las distribuciones espaciales y temporales del contenido de humedad en el suelo. Los parámetros de absorción de agua por las raíces de alfalfa, la evapotranspiración, la precipitación, las condiciones iniciales del agua del suelo y el gasto del emisor fueron datos de entrada. El espaciamiento entre las cintas de goteo fue de 1.50 m.

HYDRUS 2D/3D es un modelo bidimensional de elementos finitos desarrollado en el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los EE.UU. en Riverside, California, y ofrece una solución numérica de la ecuación de Richards para simular la humedad del suelo y el flujo de agua en suelos no saturados:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} + K(h) \right] - S(h) \quad (1)$$

Donde θ es el contenido volumétrico de agua del suelo [$L^3 L^{-3}$], h es la altura de presión del agua del suelo [L], $S(h)$ es un término hundimiento [$L^3 L^{-3} T^{-1}$] que representa la absorción de agua por las raíces de las plantas, t es el tiempo [T], y x z son las coordenadas horizontal y vertical [L] y $K(h)$ es la función de conductividad hidráulica no saturada [$L T^{-1}$].

Para resolver la ecuación (1) se requiere de las propiedades hidráulicas del suelo, descritas por la función de conductividad hidráulica no saturada, $K(h)$, y la función de retención de agua del suelo, $\theta(h)$. Se utilizaron las relaciones constitutivas de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980; 2012) y se representó la saturación efectiva, S_e por:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \frac{1}{(1 + |\alpha_{VG} h|^n)^m} \quad (2)$$

y

$$K(h) = K_s S_e^l \left[1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (3)$$

Donde θ_s y θ_r son el contenido de agua saturada y residual [$L^3 L^{-3}$] respectivamente, K_s es la conductividad hidráulica saturada [$L T^{-1}$], α_{VG} [L^{-1}], n y l son parámetros de forma y $m = 1 - 1/n$. Los parámetros de función hidráulica del suelo franco limoso utilizados se enumeran en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Parámetros de la función hidráulica del suelo franco limoso. (Carsel y Parrish 1988; Darusman *et al.*, 1997).

Tipo de suelo	θ_r ($cm^3 cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3 cm^{-3}$)	α_{VG} (cm^{-1})	n	K_s ($cm day^{-1}$)	l
Franco limoso	0.067	0.45	0.02	1.41	60.2	0.5

En el cuadro 3, θ_r y θ_s se indican como los contenidos de agua residual y saturada, respectivamente; K_s es la conductividad hidráulica saturada calculada para el suelo franco limoso cerca de Colby, Kansas (Darusman *et al.*, 1997), y l es un parámetro de conectividad de poros. Los parámetros α y n son coeficientes empíricos que afectan la forma de las funciones hidráulicas.

La distribución espacial de las raíces de la alfalfa influye en la absorción de agua por las mismas, el flujo de agua en el suelo y el drenaje profundo. Por lo tanto, determina la percolación profunda y la transpiración real de la planta para una estrategia de riego determinada. Para estas simulaciones se utilizó una distribución de raíces con la mayor densidad de raíces a una profundidad de 30 cm (Reyes-Esteves y Slack, 2019). El término de hundimiento, $S(h)$, que se usa en la ecuación (1), es para cuantificar la absorción de agua por las raíces, utilizando el enfoque de Feddes *et al.* (1976) para la alfalfa:

$$S(h) = \alpha(h) S_p \quad (4)$$

Donde $\alpha(h)$ es una función adimensional de reducción de la absorción de agua por la raíz con valores entre 0 y 1 para explicar el estrés hídrico del suelo. Si el suelo tiene condiciones favorables para la absorción de agua por las raíces, $S(h)$ es igual a la tasa potencial de absorción de agua por las raíces, S_p [$L^3 L^{-3} T^{-1}$]. Pero, si el suelo está muy seco o húmedo en cualquier lugar (x, z) , $\alpha < 1$, y la absorción en el lugar (x, z) disminuye linealmente con la magnitud resuelta por los parámetros de la función de reducción para la alfalfa (Taylor y Ashcroft, 1972). La absorción potencial de agua por las raíces, S_p , se calcula con la siguiente ecuación (Simunek y Hopmans, 2009):

$$S_p(x, y) = \beta(x, z) L_x T_p \quad (5)$$

Donde $\beta(x, z)$ [L^{-2}] representa la densidad de raíces normalizada para cualquier coordenada en el dominio bidimensional del suelo, L_x [L] denota el ancho de la superficie del suelo asociado con la transpiración potencial de la planta, T_p [LT^{-1}].

El modelo HYDRUS-2D simuló parcialmente la temporada de cultivo de la alfalfa (total de 100 días); comenzando el 1 de abril hasta el 8 de octubre del 2021. La condición inicial de humedad en el suelo aplicada fue determinada mediante el promedio de las tres réplicas de las lecturas de la sonda de neutrones medidas el 1 de abril de 2021 (o inicio de la simulación), y cada 30 cm de hasta una profundidad de 2.4 m (Cuadro 4).

Cuadro 4. Condiciones iniciales del agua del suelo para el modelo.

Profundidad (cm)	Mediciones de la sonda de neutrones el 1 de abril de 2021			Condición inicial del contenido de humedad θ ($cm^3 cm^3$)
	Rep 1	Rep 2	Rep 3	
	θ ($cm^3 cm^3$) Medición 1	θ ($cm^3 cm^3$) Medición 2	θ ($cm^3 cm^3$) Medición 3	
30	0.30	0.31	0.30	0.30
60	0.29	0.28	0.31	0.29
90	0.28	0.30	0.26	0.28
120	0.20	0.24	0.21	0.22
150	0.15	0.17	0.18	0.17
180	0.14	0.15	0.16	0.15
210	0.13	0.13	0.17	0.14
240	0.14	0.14	0.17	0.15

La evapotranspiración del cultivo (ET_c) se determinó como el producto de K_c y ET_r . Se considera que la ET_r basada en alfalfa (Lamm *et al.*, 1987) brinda mejores estimaciones que la ET_o de pasto corto en esta región (Howell, 2007). Dado a la cobertura total de la alfalfa, la evaporación del suelo puede considerarse insignificante durante la temporada de crecimiento simulada, por lo que T_p en la ecuación 5 es igual a ET_c (Kandelous *et al.*, 2012).

Los coeficientes de cultivo (K_c) se generaron utilizando el boletín de la FAO-56 (Allen *et al.*, 1998) como referencia inicial, con períodos ajustados a la duración del período de crecimiento en el noroeste de Kansas. Específicamente, los valores de K_c para el período inicial de 40 días que comenzó el 1 de abril comenzaron con un valor de 0.2

incrementando hasta un máximo de 1.0 y permaneciendo en 1.0 hasta la primera cosecha. Así sucesivamente para cosechas y periodos de crecimiento posteriores, K_c aumentó de 0.2 a un máximo de 1.0 y se mantuvo en ese valor hasta la siguiente cosecha (Lamm *et al.*, 2012):

$$ET_c = K_c ET_r \quad (6)$$

Ocurrieron cinco cosechas (Cuadro 5), con la primera cosecha llevada a cabo el 8 de junio del 2021. La quinta y última cosecha se realizó después de la primera helada (29 de octubre del 2021).

Cuadro 5. Fechas de cosecha de la producción de alfalfa de 2021 con RGS, KSU-NWREC, Colby, Kansas, EE.UU.

Cosecha #	Fecha
1	08/06/2021
2	06/07/2021
3	02/08/2021
4	31/08/2021
5	29/10/2021

En las simulaciones se seleccionó una profundidad máxima de raíces de 2 m. Se asumió un suelo homogéneo con un caudal de agua constante a lo largo de la cinta de goteo. También se asumió que el flujo de agua en suelos homogéneos fue simétrico horizontalmente entre las cintas de goteo. El dominio espacial utilizado para las simulaciones fue de 2.4 m de profundidad x 2.4 m de ancho. El espacio entre cintas fue de 1.5 m a una profundidad de 0.5 m (figura 1).

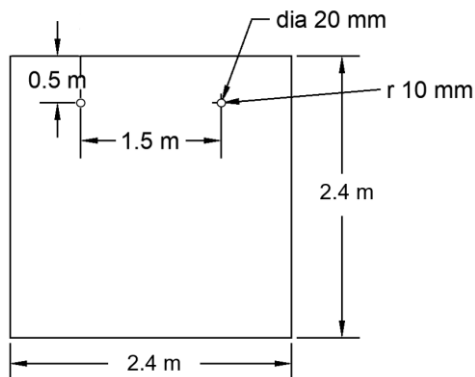


Figura 1. Dominio espacial de la simulación de riego por RGS.

El dominio espacial se discretizó utilizando elementos triangulares finitos. El tamaño de elemento finito más pequeño fue seleccionado de un tamaño de 0.5 cm y se usó alrededor del emisor. El tamaño de los elementos aumento gradualmente con la distancia desde los emisores. Se utilizó una condición de frontera de flujo variable (Variable Flux 1) en el tiempo para representar la descarga del emisor. El gasto por emisor fue de 0.6 L h⁻¹. El diámetro interior de 20 mm, con un espesor de pared de 381 µm y una separación entre emisores de 0.3 m (Ro-Drip XL 12-15, Roberts Irrigation Products, Inc., San Marcos, California). Se estableció una condición de frontera de drenaje libre (Free Drainage) en la parte inferior y una condición de limite atmosférico (Atmospheric Boundary) en la parte

superior. Los límites restantes se establecieron en una configuración de no flujo de agua (No Flux). Ver figura 2.

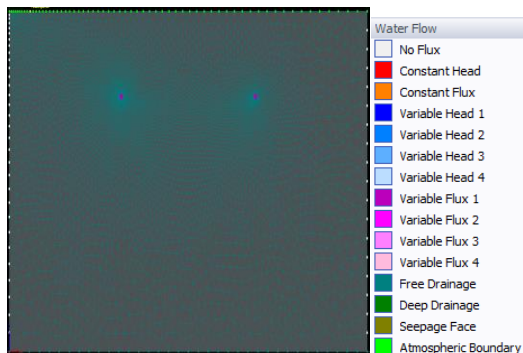


Figura 2. Condiciones de frontera del modelo simulado.

Precisión del Modelo y Análisis Estadístico

La precisión del modelo HYDRUS-2D se evaluó mediante los siguientes puntos de control (Rana *et al.*, 2022): Comparación entre el contenido de humedad del suelo simulado y observado mediante los resultados del coeficiente de determinación (R^2) y de la raíz del error cuadrático medio ($RECM$). El R^2 se calculó utilizando el contenido de humedad observado y simulado para indicar la precisión de la regresión, que oscila entre 0 y 1:

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)(P_i - P_m))^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2 \sum_{i=1}^n (P_i - P_m)^2} \quad (7)$$

Donde O_i es el contenido volumétrico de agua observado, P_i es el contenido volumétrico de agua simulado; O_m es el contenido de agua volumétrico medio observado y P_m es el contenido de agua volumétrico medio simulado. Se calculó la $RECM$ para los contenidos volumétricos de agua medidos y simulados para cuantificar la bondad de ajuste entre los datos simulados y observados con la siguiente ecuación:

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (8)$$

Donde O_i es el contenido volumétrico de agua observado y P_i es el contenido volumétrico de agua simulado. Valores más bajos de la $RECM$ y valores más altos del R^2 fueron los criterios para evaluar el desempeño del modelo.

Resultados y Discusión

Evaluación del Modelo HYDRUS-2D para Evaluar el Contenido de Humedad en Dirección Vertical

En el Cuadro 6 se proporciona una comparación de tres lecturas de la sondas de neutrones (3 repeticiones) y los resultados del modelo o los contenidos de agua previstos para esas fechas respectivas por el modelo.

Cuadro 6. Comparación del contenido volumétrico de agua obtenido con HYDRUS-2D y con la sonda de neutrones (3 repeticiones).

Fecha	Profundidad (cm)	HYDRUS-2D resultados	Medidas de contenido de humedad con la sonda de neutrones		
			Rep 1	Rep 2	Rep 3
		θ (cm ³ cm ³)	θ (cm ³ cm ³) Medición 1	θ (cm ³ cm ³) Medición 2	θ (cm ³ cm ³) Medición 3
01/04/2021	30	0.31	0.30	0.31	0.30
	60	0.29	0.29	0.28	0.31
	90	0.28	0.28	0.30	0.26
	120	0.25	0.20	0.24	0.21
	150	0.18	0.15	0.17	0.18
	180	0.16	0.14	0.15	0.16
	210	0.15	0.13	0.13	0.17
	240	0.15	0.14	0.14	0.17
08/06/2021	30	0.26	0.24	0.25	0.24
	60	0.26	0.24	0.24	0.25
	90	0.25	0.25	0.27	0.21
	120	0.21	0.20	0.21	0.18
	150	0.19	0.16	0.17	0.17
	180	0.18	0.15	0.15	0.16
	210	0.18	0.13	0.14	0.17
	240	0.18	0.14	0.14	0.17
24/06/2021	30	0.26	0.22	0.24	0.24
	60	0.26	0.23	0.23	0.25
	90	0.25	0.24	0.28	0.21
	120	0.19	0.19	0.20	0.18
	150	0.18	0.15	0.16	0.16
	180	0.18	0.15	0.15	0.16
	210	0.18	0.13	0.14	0.17
	240	0.18	0.14	0.14	0.17

Figuras 3 – 5 muestran una comparación gráfica de las predicciones del modelo y los datos observados. El patrón de humedad pronosticado por el modelo generalmente concuerda con las lecturas de la sonda de neutrones ya que el contenido volumétrico de agua a diferentes profundidades es comparable, al igual que su distribución a lo largo del perfil del suelo. Por lo tanto, como puede verse en estos resultados, los contenidos de agua simulados por HYDRUS-2D concordaron razonablemente bien con los correspondientes medidos y mostraron una tendencia razonable en la distribución del contenido de humedad durante las fechas comparadas.

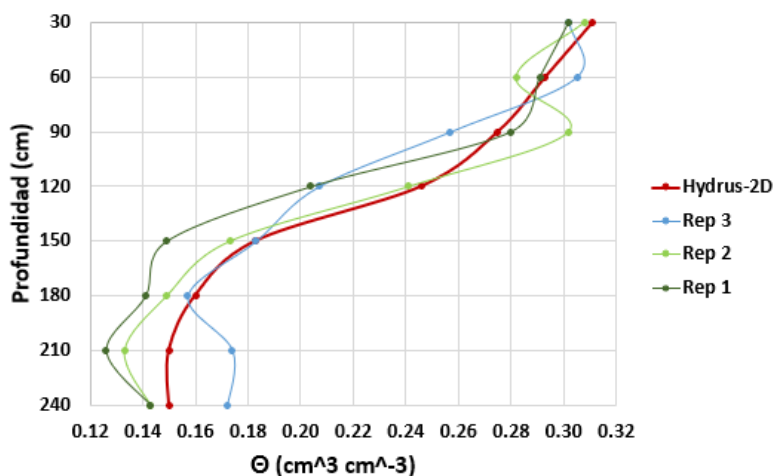


Figura 3. Distribución del contenido de humedad el 1 de abril de 2021 determinada por HYDRUS-2D y por la sonda de neutrones (tres réplicas).

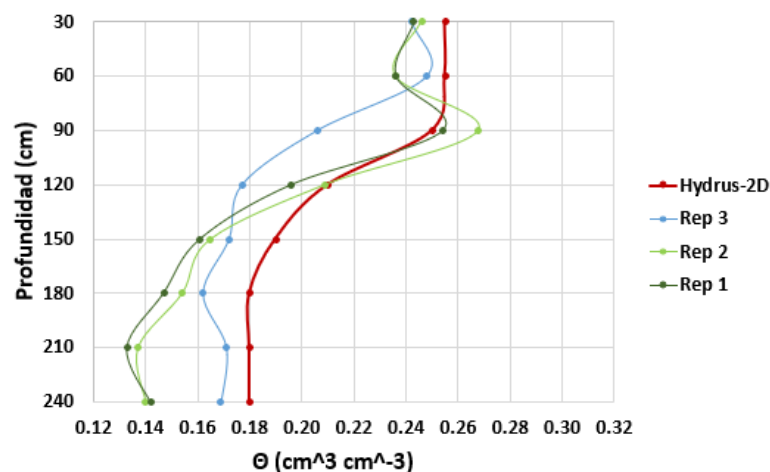


Figura 4. Distribución del contenido de humedad el 8 de junio de 2021 determinada por HYDRUS-2D y por la sonda de neutrones (tres réplicas).

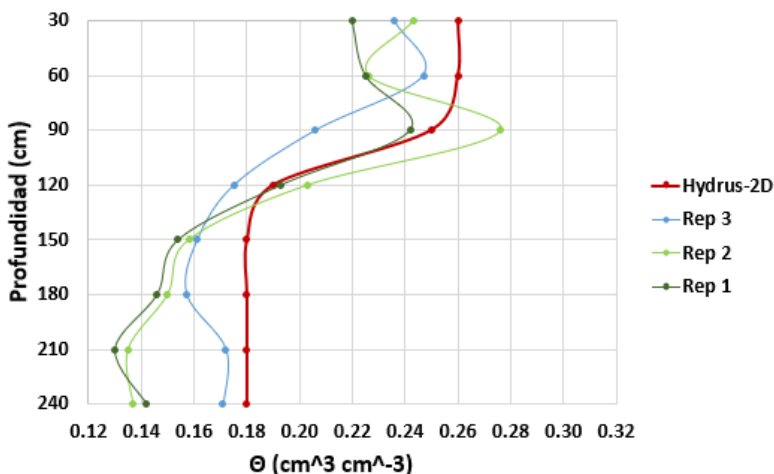


Figura 5. Distribución del contenido de humedad el 24 de junio de 2021 determinada por HYDRUS-2D y por la sonda de neutrones (tres réplicas).

La raíz del error cuadrático medio (*RECM*) para los contenidos volumétricos de agua simulados y observados proporciona una medida cuantitativa de la bondad de ajuste entre los datos actuales y simulados. El valor de la *RECM* para las fechas de las lecturas de la sonda de neutrones comparadas y los resultados de HYDRUS-2D se proporciona en el Cuadro 7. Los valores de *RECM* varían de 0.012 a 0.029 cm³cm⁻³. Cuanto más bajos son los valores de la *RECM*, mejor es el comportamiento del modelo, lo que indica una buena precisión de este.

Cuadro 7. Raíz del error cuadrático medio (*RECM*) de los resultados de las simulaciones del modelo HYDRUS-2D.

Fecha	<i>RECM</i> 1	<i>RECM</i> 2	<i>RECM</i> 3
01/04/2021	0.020	0.012	0.017
08/06/2021	0.025	0.023	0.020
24/06/2021	0.029	0.027	0.019

El modelo predijo el contenido de humedad en el suelo durante la temporada de crecimiento con una precisión razonablemente buena. Los resultados de las regresiones muestran pendientes y valores de intercepción similares. Por ejemplo, los valores de la pendiente de los contenidos de humedad (con tres réplicas) para el día 1 de abril de 2021 (Figura 6) oscilan entre 0.88 y 1.07 y los valores de intercepción van desde -0.01 hasta +0.04 cm³ cm⁻³. De manera similar, las tres réplicas muestran valores altos de R^2 (0.90, 0.96, 0.97), lo que indica una fuerte relación entre los resultados previstos y los reales para las fechas comparadas.

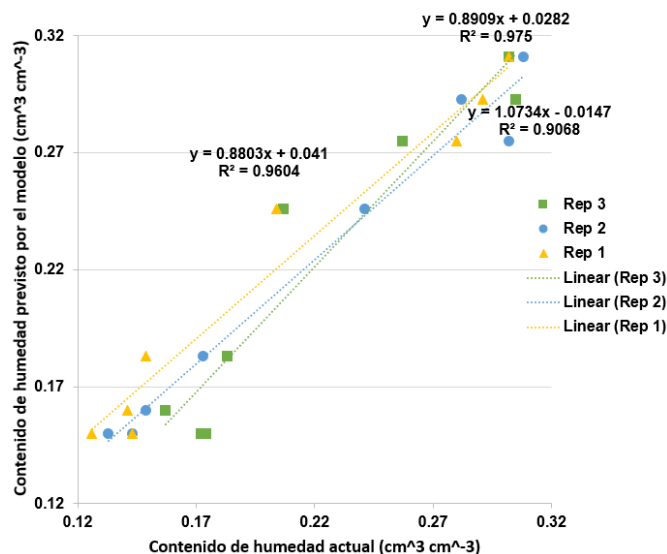


Figura 6. Correlación del contenido de humedad (θ) previsto frente al actual (1 de abril de 2021).

Estas correlaciones indican el potencial del modelo para simular el flujo de agua y el contenido de humedad durante el periodo simulado. Resultados similares fueron obtenidos previamente por Skaggs *et al.* 2004, quien comparo resultados simulados con mediciones de campo realizadas en un suelo franco-arenoso. El modelo describió

adecuadamente el contenido de agua del suelo al final del riego y 24 h después del mismo. La validación del contenido y distribución de agua en el suelo con el modelo HYDRUS-2D ha sido bien reconocida para sistemas de RGS (Assouline, 2002; Mmolawa y Or, 2003; Skaggs *et al.*, 2004; Roberts *et al.*, 2009).

Los resultados sugieren que la precisión de las simulaciones depende de la condición inicial y de las condiciones de frontera. La precisión se puede mejorar con un mejor conocimiento de la distribución de raíces, los parámetros de la función hidráulica del suelo específicos del sitio y la precisión en todos los datos de entrada. Aunque ET_c es la principal variable de agua para el modelado de cultivos, la distribución de raíces también desempeña un papel fundamental en el control del transporte y la acumulación de agua en el suelo. La mayor parte de la absorción de agua por las raíces ocurre cerca de los emisores, donde evidentemente la disponibilidad de agua es la más alta. Los conceptos tradicionales de distribución de raíces con sistemas de riego superficial no representan adecuadamente la distribución de raíces de los cultivos que se riegan bajo RGS (Roberts *et al.*, 2009). Poca investigación se ha centrado en la ET real cuando se utiliza RGS como fuente principal de riego. Bonachela *et al.* (2001) documentaron la diferencia entre el riego por goteo superficial y RGS y concluyeron que el RGS produce valores de ET anuales más bajos que podrían atribuirse a un área mojada más pequeña en la superficie del suelo. Estudios futuros se necesitan para una mejor comprensión de los valores de ET bajo RGS.

Conclusiones

El modelado numérico es un enfoque rápido y económico para estudiar y optimizar las prácticas de manejo y diseño de RGS. El software HYDRUS se ha utilizado en cientos de aplicaciones exitosas publicadas en artículos de revistas científicas. En este estudio, se verificó la idoneidad del modelo para evaluar el contenido de humedad y el proceso de distribución agua a lo largo del perfil del suelo en alfalfa regada con RGS en un suelo franco limoso en Colby, Kansas EE. UU. Las dificultades para aplicar el modelo HYDRUS-2D pueden incluir el requisito de los parámetros hidráulicos del suelo para una ubicación específica, la distribución del crecimiento de las raíces y la dependencia de la precisión de todos los datos ingresados. Realizar mediciones detalladas de las propiedades hidráulicas del suelo para cierta ubicación puede ser costoso y requerir mucho esfuerzo; por lo tanto, podría disminuir una ventaja principal de una simulación. Sin embargo, el modelo HYDRUS-2D pudo predecir con precisión el contenido de agua del suelo para la alfalfa en este estudio. Estudios futuros son necesarios para investigar la precisión de las simulaciones para la temporada de crecimiento completa. En general, los resultados respaldan el uso del modelo HYDRUS-2D como instrumento útil para simular la dinámica del agua del suelo. La calibración y validación del modelo puede ayudar a los ingenieros en irrigación e investigadores a modelar el transporte de agua con RGS. La precisión de la simulación de HYDRUS-2D se justifica y ciertamente es lo suficientemente precisa para demostrar el uso de HYDRUS-2D como herramienta para diseñar prácticas de manejo de RGS.

Referencias Bibliográficas

- Akbar, A. K., Yitayew, M., & Warrick, A. W. (1996). Field evaluation of water and solute distribution from a point source. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 122(4), 221–227.
- Alam, M., Trooien, T. P., Dumler, T. J., & Rogers, D. H. (2002). Using subsurface drip irrigation for alfalfa 1. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 38(6), 1715-1721.
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *Fao, Rome*, 300(9), D05109.
- Assouline, S. (2002). The effects of microdrip and conventional drip irrigation on water distribution and uptake. *Soil Science Society of America Journal*, 66(5), 1630-1636.
- Ben-Gal, A., Lazorovitch, N., & Shani, U. (2004). Subsurface drip irrigation in gravel-filled cavities. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1407-1413.
- Bonachela, S., Orgaz, F., Villalobos, F. J., & Fereres, E. (2001). Soil evaporation from drip-irrigated olive orchards. *Irrigation Science*, 20(2), 65-71.
- ASAE (American Society of Agricultural Engineers). (2005). Design and installation of micro-irrigation systems. *ASAE EP405.1 FEB03. St. Joseph, MI: ASAE*.
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water resources research*, 24(5), 755-769.
- Cook, F. J., Fitch, P., Thorburn, P. J., Charlesworth, P. B., & Bristow, K. L. (2006). Modelling trickle irrigation: comparison of analytical and numerical models for estimation of wetting front position with time. *Environmental Modelling & Software*, 21(9), 1353-1359.
- Cote, C. M., Bristow, K. L., Charlesworth, P. B., Cook, F. J., & Thorburn, P. J. (2003). Analysis of soil wetting and solute transport in subsurface trickle irrigation. *Irrigation Science*, 22(3-4), 143-156.
- Darusman, Khan, A. H., Stone, L. R., Spurgeon, W. E., & Lamm, F. R. (1997). Water flux below the root zone vs. irrigation amount in drip-irrigated corn. *Agronomy Journal*, 89(3), 375-379.
- Godoy-Avila, C., Pérez-Gutiérrez, A., Torres, C. A., Hermosillo, L. J., & Reyes, I. (2003). Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. *Agrociencia*, 37(2), 107-115.



- Hinnell, A. C., Lazarovitch, N., Furman, A., Poulton, M., & Warrick, A. W. (2010). Neuro-Drip: estimation of subsurface wetting patterns for drip irrigation using neural networks. *Irrigation Science*, 28(6), 535-544.
- Howell, T. A. (2007). Personal communication concerning alfalfa-based reference evapotranspiration. *Research leader and Irrigation Engineer, USDA-ARS CPRL, Bushland, Tex*, 19.
- Hutmacher, R. B., Phene, C. J., Mead, R. M., Shouse, P., Clark, D., Vail, S. S., & Fargerlund, J. (2001). Subsurface drip and furrow irrigation comparison with alfalfa in the Imperial Valley. *In Proc. 2001 California Alfalfa & Forage Symposium, Modesto, CA* (pp. 11-13).
- 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.
- Kandelous, M. M., Kamai, T., Vrugt, J. A., Šimůnek, J., Hanson, B., & Hopmans, J. W. (2012). Evaluation of subsurface drip irrigation design and management parameters for alfalfa. *Agricultural Water Management*, 109, 81-93.
- Lamm, F. R., Pacey, D. A., & Manges, H. L. (1987). Spreadsheet templates for the calculation of Penman reference evapotranspiration. *In Mid-Central Regional Meeting of the ASAE, St. Joseph, Missouri*.
- Lamm, F. R., Harmoney, K. R., Aboukheira, A. A., & Johnson, S. K. (2012). Alfalfa production with subsurface drip irrigation in the Central Great Plains. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1203-1212.
- Lamm, F. R. (2016). Subsurface drip irrigation and possibilities in alfalfa. *In California Alfalfa and Forage Symposium*.
- Lazarovitch, N., Šimůnek, J., & Shani, U. (2005). System-dependent boundary condition for water flow from subsurface source. *Soil Science Society of America Journal*, 69(1), 46-50.
- Lazarovitch, N., Poulton, M., Furman, A., & Warrick, A. W. (2009). Water distribution under trickle irrigation predicted using artificial neural networks. *Journal of Engineering Mathematics*, 64(2), 207-218.
- Meshkat, M., Warner, R. C., & Workman, S. R. (1999). Modeling of evaporation reduction in drip irrigation system. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 125(6), 315-323.



- Payero, J. (2002). Is subsurface drip irrigation right for your operations. *Crop watch new service web page, Univ. of Nebraska, Institute of Agriculture and Natural Resources Cooperative Extension*.
- Provenzano, G. (2007). Using HYDRUS-2D simulation model to evaluate wetted soil volume in subsurface drip irrigation systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 342-349.
- Putman, D., Russell, M., Orloff, S., Kuhn, J., Fitzhugh, L., Godfrey, L., & Long, R. (2001). Alfalfa, wildlife and the environment. *California Alfalfa and Forage Association*.
- Rana, B., Parihar, C. M., Nayak, H. S., Patra, K., Singh, V. K., Singh, D. K., ... & Jat, M. L. (2022). Water budgeting in conservation agriculture-based sub-surface drip irrigation using HYDRUS-2D in rice under annual rotation with wheat in Western Indo-Gangetic Plains. *Field Crops Research*, 282, 108519.
- Reyes-Esteves, R. G., & Slack, D. C. (2019). Modeling approaches for determining appropriate depth of subsurface drip irrigation tubing in alfalfa. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 145(10), 04019021.
- Reyes-Esteves, R. G., Gerba, C. P. & Slack, D. C. (2022). Control of Viral and Bacterial Contamination of Lettuce by Subsurface Drip-Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, In press.
- Sakaguchi, A., Yanai, Y., & Sasaki, H. (2019). Subsurface irrigation system design for vegetable production using HYDRUS-2D. *Agricultural Water Management*, 219, 12-18.
- Sanden, B., Klonsky, K., Putnam, D., Schwankl, L., & Bali, K. (2011). Comparing costs and efficiencies of different alfalfa irrigation systems. In *Proceedings, 2011 Western Alfalfa & Forage Conference*.
- Schmitz, G. H., Schütze, N., & Petersohn, U. (2002). New strategy for optimizing water application under trickle irrigation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 128(5), 287-297.
- Šimůnek, J., & Hopmans, J. W. (2009). Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological modelling*, 220(4), 505-521.
- Šimůnek, J., Šejna, M., & Van Genuchten, M. T. (1999). The HYDRUS-2D software package for simulating the two-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably saturated media: Version 2.0. *US Salinity Laboratory, Agricultural Research Service, US Department of Agriculture*.



- Šimůnek, J., van Genuchten, M.Th., Sejna, M. (2008). Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages, and related codes. *Vadose Zone J.* 7 (2), 587–600.
- Šimůnek, J., Van Genuchten, M. T., & Šejna, M. (2016). Recent developments and applications of the HYDRUS computer software packages. *Vadose Zone Journal*, 15(7), vzj2016-04.
- 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.
- Taylor, S. A., and G. M. Ashcroft. 1972. Physical edaphology. *San Francisco: Freeman*.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Van Genuchten, M. T., Šimunek, J., Leij, F. J., Toride, N., & Šejna, M. (2012). STANMOD: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1355-1366.
- Warrick, A. W., & Lazarovitch, N. (2007). Infiltration from a strip source. *Water resources research*, 43(3).
- Zur, B. (1996). Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. *Irrigation Science*, 16(3), 101-105.