

# EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO, USO DEL AGUA, PRODUCTIVIDAD DEL AGUA Y MODELADO DEL AGUA EN EL SUELO EN MAÍZ REGADO CON GOTEO SUBTERRÁNEO

Rocío Guadalupe Reyes Esteves<sup>1\*</sup>; Beatriz Hernández Bautista<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Kansas State University – Southwest Research Extension Center. 4500 E. Mary Street, Garden City, Kansas, 67846 USA.

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

<sup>2</sup>Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, 56230 Texcoco, Estado de México

## Resumen

El acuífero de Ogallala se está agotando a un ritmo acelerado, lo que requiere el uso de métodos de riego más eficientes que los sistemas tradicionales de pivote central y avance frontal. El riego por goteo subterráneo (RGS) puede ser una alternativa viable cuando el agua es limitada o la capacidad de riego es insuficiente. Sin embargo, el RGS no garantiza todos los beneficios potenciales; también se requiere un diseño y una gestión adecuados. La presente investigación se llevó a cabo en Colby, Kansas, durante la temporada 2023 para evaluar cuatro estrategias diferentes de RGS en maíz. Las estrategias de riego fueron una combinación de frecuencia/momento de riego (semanal o quincenal) aplicado antes y después de la etapa reproductiva R1. Los niveles de riego fueron del 100%, 85%, 75% y 65% de la ET calculada menos precipitación. El uso del agua, la productividad del agua y el rendimiento del maíz se vieron ligeramente afectados por las estrategias de riego. Los rendimientos promedio de maíz fueron 12.7, 12.5, 12.4 y 12.3 Mg ha<sup>-1</sup> para los tratamientos 100, 85, 75 y 65% ET - precipitación, respectivamente. El modelo de simulación HYDRUS-2D se utilizó para comparar los datos de contenido volumétrico de agua del perfil del suelo simulados y medidos a una profundidad de 2.4 m. Los resultados refuerzan el uso de HYDRUS-2D para investigar y diseñar prácticas de manejo de RGS en maíz.

**Palabras claves:** Riego por goteo subterráneo, uso del agua, rendimiento del maíz, productividad del agua, simulación numérica.

## Introducción

El maíz es el principal cultivo de regadío en la región de las Grandes Llanuras Centrales de los Estados Unidos de América. En el noroeste semiárido de Kansas, las precipitaciones son limitadas, con una media anual que oscila entre los 406 mm y 508 mm en la región. Esto representa entre el 69 y el 87 % del agua utilizada para el cultivo del maíz. Sin embargo, el riego alivia los efectos del estrés hídrico del maíz, pero a costa de la disminución continua del acuífero de Ogallala. El acuífero de Ogallala es una reserva de agua subterránea que se encuentra debajo de varios estados del centro y oeste de Estados Unidos. Es el acuífero más grande del país y una de sus principales fuentes de agua dulce.

Se han realizado esfuerzos para desarrollar mejores estrategias de gestión del riego para optimizar el rendimiento del maíz de grano y ahorrar agua. Las principales empresas de semillas de maíz también han llevado a cabo un amplio desarrollo de híbridos en la región del Cinturón del Maíz de los Estados Unidos para desarrollar híbridos de maíz tolerantes a la sequía. El riego por aspersión con pivote central es el principal método de riego en las Grandes Llanuras Centrales de los Estados Unidos. Sin embargo, algunos productores están comenzando a utilizar el riego por goteo subterráneo (RGS) para utilizar el agua de manera eficaz al limitar las pérdidas de agua por evaporación, escorrentía y percolación profunda. Las principales desventajas de los sistemas RGS son el daño causado por roedores, la reparación de fugas, el constante monitoreo y la evaluación de los eventos de riego y el alto costo inicial; no obstante, existen algunas situaciones en las que la economía puede compararse favorablemente con el uso del pivote central (Lamm et al., 2020). Lamm y Trooien (2003) reportaron que el RGS puede reducir el uso de agua de riego para la producción de maíz entre un 35% y un 55% en comparación con métodos de riego por aspersión. Camp (1998) reportó que el rendimiento de más de 30 cultivos fue mayor o equivalente usando RGS que el rendimiento obtenido con otros métodos de riego y simultáneamente requirió menos agua.

Estudios de investigación han evaluado numerosos factores de diseño para sistemas de RGS para la producción de maíz en suelos franco limosos de las Grandes Llanuras Centrales de Estados Unidos. Las profundidades de las cintas de goteo que oscilaron entre 0.20 y 0.60 m fueron aceptables para la producción de maíz, sin diferencias significativas en la productividad del agua y solo ligeras reducciones en el rendimiento de grano de maíz (Lamm y Trooien, 2003). Comprender el potencial completo de los sistemas de RGS incluye mejorar los parámetros de diseño, como la frecuencia y la duración de cada evento de riego, la tasa de descarga, el espacio entre las cintas de goteo y su profundidad de instalación.

Los modelos de simulación numéricos estudian las prácticas óptimas de manejo de RGS (Cote et al., 2003; Schmitz et al., 2002; Meshkat et al., 1999). Estos modelos nos permiten comprender los procesos físicos que rigen el flujo de agua en la zona de las raíces y, por lo tanto, evaluar la dimensión de los patrones de mojado en función de la cantidad de riego. El uso de modelos de simulación de agua del suelo contribuye al desarrollo de mejores estrategias de gestión del riego. Conocer las dimensiones del volumen del suelo saturado en función del tiempo ayuda a reconocer los parámetros de diseño adecuados y la duración de

un evento de riego (Reyes-Esteves & Slack, 2019; Provenzano, 2007). Sin embargo, es necesario validar la precisión de los modelos de simulación. Por lo tanto, es necesario calibrar el modelo utilizando mediciones de campo (Provenzano, 2007). Los objetivos de este estudio son evaluar el efecto de diferentes estrategias de riego en el rendimiento del maíz, el uso del agua y la productividad del agua, así como simular y calibrar el modelo de redistribución del agua en el suelo HYDRUS-2D en un suelo franco limoso de la región semiárida del Noroeste de Kansas.

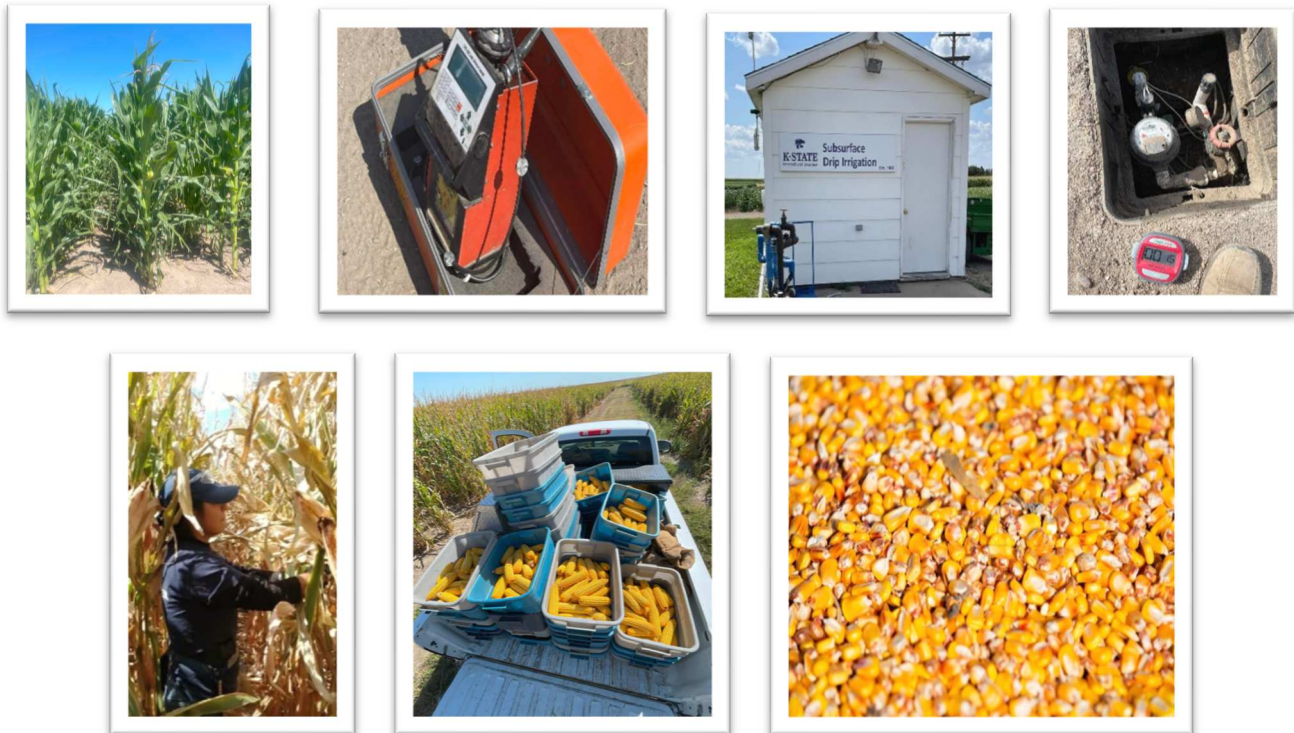
## Materiales y Métodos

El estudio se llevó a cabo en el Centro de Investigación y Extensión del Noroeste de Kansas perteneciente a la Universidad Estatal de Kansas, ubicado en Colby, Kansas, EE. UU., durante la temporada de crecimiento de 2023 en un suelo franco limoso Keith loessial, profundo y bien drenado (Bidwell et al., 1980). El perfil del suelo de 2.4 m contiene 444.5 mm de agua disponible a capacidad de campo. El clima se clasifica como semiárido, con un patrón de precipitación de verano y una precipitación anual promedio a largo plazo de aproximadamente 477.5 mm. La precipitación promedio a largo plazo es de aproximadamente 406.4 mm de abril a octubre.

El estudio consistió en un diseño en bloques completos al azar de cuatro tratamientos de riego diferentes (100 %, 85 %, 75 % y 65 % de la ET calculada con buen riego menos la lluvia) con tres réplicas. Cada parcela tenía 6 m de ancho x 85 m de largo, con líneas de goteo espaciadas a 1.5 m consecutivamente de oeste a este. Las distancias de amortiguamiento fueron de aproximadamente 6 m x 12 m y se ubicaron en los bordes oeste y este del área de estudio para reducir los impactos ambientales desde fuera del área de investigación. El balance hídrico fue construido utilizando datos climatológicos recopilados de la estación meteorológica NOAA ubicada aproximadamente a 0.59 km al noreste del sitio de estudio. La evapotranspiración de referencia (ET<sub>r</sub>) se calculó utilizando una combinación de la ecuación de Penman modificada (Lamm et al., 1987). La ET<sub>r</sub> fue basada en alfalfa, la cual brinda mejores estimaciones que la ET<sub>o</sub> de pasto corto en esta región (Howell et al., 2007).

Se aplicó fertilización para mejorar los rendimientos. Se recolectaron muestras de suelo en el sitio de estudio antes de la plantación y luego se transfirieron a contenedores estériles, se secaron y se molieron antes de ser analizadas. El Laboratorio de Análisis de Suelos de la Universidad Estatal de Kansas (Kansas State University) analizó muestras de suelo y proporcionó las mejores recomendaciones de fertilizantes. También se utilizaron procedimientos de control de plagas con herbicidas para minimizar las malezas.

El agua en el suelo se midió en la zona radicular (2.4 m) con una sonda de neutrones periódicamente durante la temporada para cuantificar los períodos de estrés hídrico y calcular el uso de agua del cultivo. El gasto promedio en el sistema fue de 0.09 L/s. Se realizó la cosecha manual de muestras características de maíz de cada tratamiento en la madurez fisiológica para determinar el rendimiento del maíz de grano (Figura 1). El uso de agua del cultivo se calculó como la suma de la precipitación, el riego y la variación del agua del suelo disponible a lo largo de la temporada dentro de un perfil de suelo de 2.4 m. La productividad del agua del cultivo se calculó como el rendimiento dividido por el uso de agua del cultivo.



**Figura 1.** Realización de la medición del agua en el (2.4 m) con la sonda de neutrones. RGS. Cosecha manual del maíz en la madurez fisiológica para determinación del rendimiento.

### Modelación numérica con HYDRUS-2D

Para modelar el movimiento del agua en el suelo se utilizó el módulo bidimensional del software HYDRUS 2D/3D versión 2.x. HYDRUS 2D/3D es un modelo de elementos finitos bidimensional desarrollado en el Laboratorio de Salinidad del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en Riverside, California, que ofrece una solución numérica de la ecuación de Richards para modelar 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  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua en el suelo [ $L^3 L^{-3}$ ],  $h$  es la carga de presión del agua en el suelo [L],  $S(h)$  es un término de sumidero [ $L^3 L^{-3} T^{-1}$ ] que representa la absorción de agua por las raíces de las plantas,  $t$  es el tiempo [T],  $K(h)$  es la función de conductividad hidráulica no saturada [ $LT^{-1}$ ], y  $x$  y  $z$  son las coordenadas horizontales y verticales [L].

El modelo utilizó información sobre el sitio de estudio, el clima, y del diseño y manejo del sistema de riego. HYDRUS 2D/3D simuló el flujo de agua en el suelo y calculó las distribuciones espaciales y temporales del contenido volumétrico de agua en el suelo. Las

variables de entrada fueron evapotranspiración, precipitación, condiciones iniciales de humedad en el suelo, eventos de riego y espaciamiento de cintas de goteo de 1.50 m.

Para resolver la ecuación (1), se utilizaron 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 de van Genuchten-Mualem (van Genuchten, 1980; 2012) y se represento la saturación efectiva, Se mediante:

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

Y

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

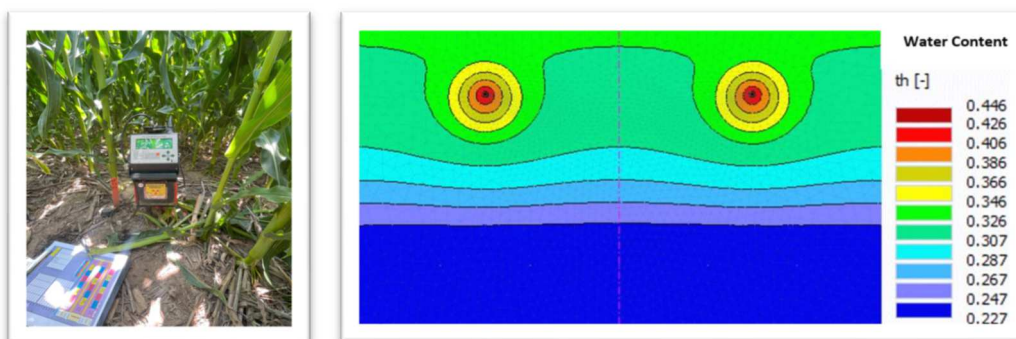
Donde  $\theta_s$  y  $\theta_r$  son el contenido de agua saturada y residual [ $L^3 L^{-3}$ ], respectivamente,  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada [ $LT^{-1}$ ],  $\alpha_{VG}$  [ $L^{-1}$ ],  $n$  y  $l$  son parámetros de forma, y  $m = 1 - 1/n$ . Los parámetros de la función hidráulica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

**Cuadro 1.** Parámetros de la función hidráulica del suelo franco limoso. (Carsel y Parrish 1988; Darusman et al., 1997).

Tipo de suelo	$\theta_r$ ( $cm^3 cm^{-3}$ )	$\theta_s$ ( $cm^3 cm^{-3}$ )	$\alpha_{VG}$ ( $cm^{-1}$ )	$n$	$K_s$ ( $cm day^{-1}$ )	$l$
Franco limoso	0.067	0.45	0.02	1.41	60.2	0.5

$\theta_r$  y  $\theta_s$  denotan los contenidos de agua residual y saturada, respectivamente;  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada calculada para el suelo franco limoso de Colby, Kansas (Darusman et al., 1997), y  $l$  es el parámetro de conectividad de porosidad del suelo. Los parámetros  $\alpha$  y  $n$  son coeficientes empíricos que afectan la forma de las funciones hidráulicas.

Las simulaciones asumieron un suelo homogéneo simétrico y un flujo de agua horizontal entre las cintas de goteo. Los análisis de datos incluyeron comparaciones del contenido de agua del suelo simulado y observado y su correlación con el rendimiento del maíz, el uso del agua en la temporada y la productividad del agua y se analizó como se vieron afectados por los cuatro tratamientos de riego.



**Figura 1.** Medición en campo del contenido de agua en el suelo vs. modelación en HYDRUS 2D del agua en el suelo.

### Precisión del modelo y análisis estadístico

El modelo HYDRUS-2D se evaluó mediante los siguientes puntos de control (Rana et al., 2022): comparación entre el contenido de agua del suelo simulado y observado, el cuadrado medio del error (CME) y el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), que se calcula utilizando el contenido de agua del suelo observado y simulado para indicar la fuerza de la regresión, que varía entre 0 y 1:

$$R^2 = \frac{(\sum_i^n (O_i - O_m)(P_i - P_m))^2}{\sum_i^n (O_i - O_m)^2 \sum_i^n (P_i - P_m)^2} \quad (4)$$

Donde  $O_i$  es el contenido volumétrico de agua observado,  $P_i$  es el contenido volumétrico de agua simulado,  $O_m$  es el contenido volumétrico de agua medio observado y  $P_m$  es el contenido volumétrico de agua medio simulado.

Se calculó el CME para los contenidos volumétricos de agua medidos y simulados para cuantificar la bondad de ajuste entre los datos simulados y observados.

$$CME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (5)$$

Un CME más bajo y un  $R^2$  más alto fueron los criterios para evaluar el desempeño del modelo.

### Resultados y Discusión

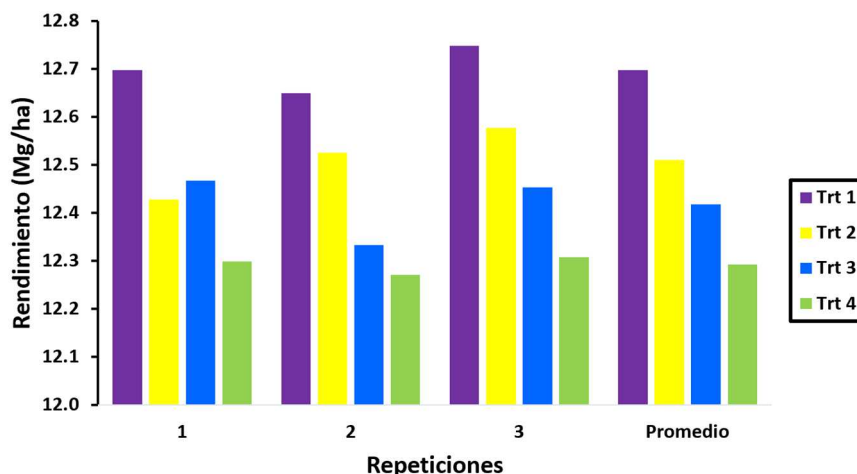
Las condiciones de crecimiento fueron satisfactorias, produciendo buen maíz en la temporada de crecimiento 2023 (Tabla 2). La precipitación promedio en 2023 fue de casi 436.11 mm durante abril - octubre y 431.29 mm de lluvia desde la siembra hasta la cosecha. Las cantidades de riego aplicadas fueron 284.48, 238.76, 205.74 y 175.26 mm para los tratamientos de 100, 85, 75 y 65% ET – precipitación. Los rendimientos promedio de maíz fueron 12.7, 12.5, 12.4 y 12.3 Mg/ha para los tratamientos de 100, 85, 75 y 65% ET - Lluvia (Figura 2). El uso promedio de agua fue de 12.7, 12.5, 12.4 y 12.3 Mg/ha para los tratamientos

de 100, 85, 75 y 65% ET - Lluvia (Figura 3). La productividad del agua del cultivo promedió fue de 0.019, 0.020, 0.021 y 0.022 Mg/ha-mm para los tratamientos de 100, 85, 75 y 65% ET – precipitación (Figura 4).

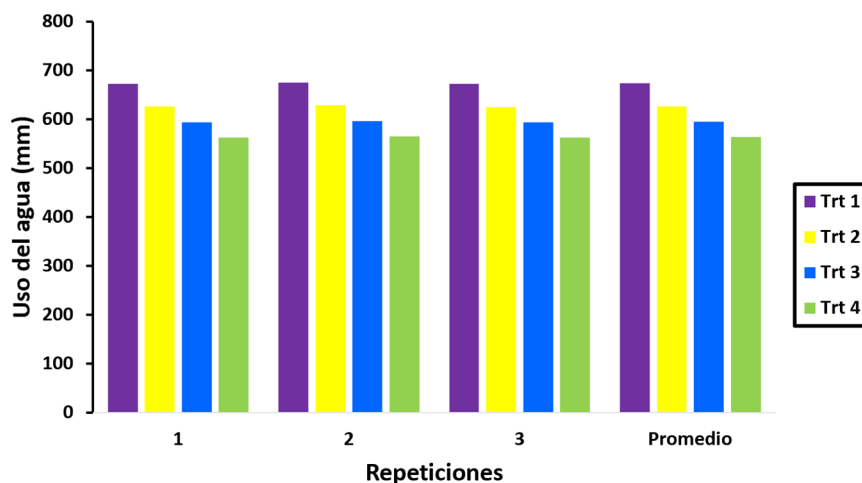
**Cuadro 2.** Rendimiento del maíz, uso total de agua del cultivo y productividad del agua.

Tratamiento de riego	Repetición	Uso del agua (mm)	Rendimiento (Mg/ha)	Productividad del agua (Mg/ha-mm)
Trt 1: 100% ET	1	672.8	12.7	0.019
Trt 2: 85% ET		625.9	12.4	0.020
Trt 3: 75% ET		594.4	12.5	0.021
Trt 4: 65% ET		562.6	12.3	0.022
Trt 1: 100% ET	2	675.4	12.6	0.019
Trt 2: 85% ET		628.4	12.5	0.020
Trt 3: 75% ET		596.9	12.3	0.021
Trt 4: 65% ET		565.2	12.3	0.022
Trt 1: 100% ET	3	672.6	12.7	0.019
Trt 2: 85% ET		625.6	12.6	0.020
Trt 3: 75% ET		594.1	12.5	0.021
Trt 4: 65% ET		562.4	12.3	0.022

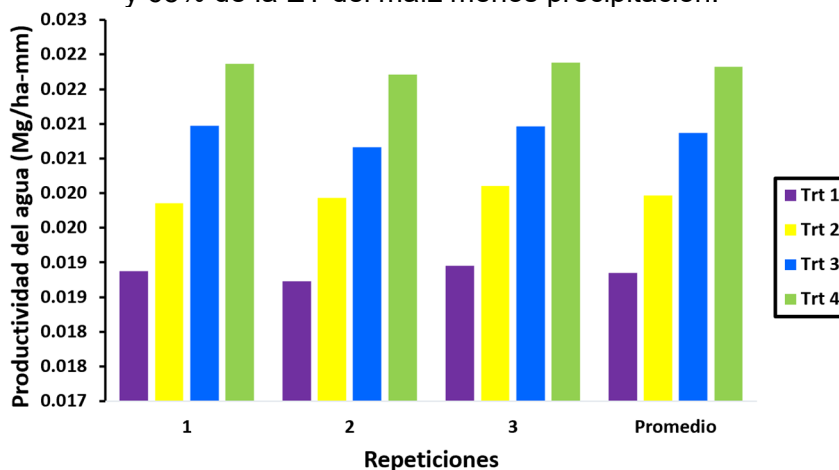
Los resultados no demuestran diferencias significativas en el rendimiento del maíz de grano, lo que indica que reemplazar el riego al 75% de ET – precipitación en un año con cantidades razonables de lluvia, como en 2023, podría ser una estrategia de riego satisfactoria para ahorrar agua y lograr un alto rendimiento de maíz. Sin embargo, la buena precipitación y la capacidad de retención de agua para este suelo franco limoso durante la temporada de crecimiento de 2023 pueden estar amortiguando las variaciones que posiblemente ocurrirían entre los tratamientos de riego en años más secos. Se debe tener en cuenta que el maíz es un cultivo con raíces profundas y extensas que puede explorar una gran zona dentro del suelo. Las distancias de las líneas de goteo de 1.5 m en el área proporcionan agua adecuada para lograr rendimientos razonablemente altos en la población plantada. Un evento de riego extensivo beneficiaría espaciamientos más amplios de las cintas de goteo.



**Figura 2.** Rendimiento del maíz de grano (Mg/ha) con cuatro tratamientos de riego.



**Figura 3.** Uso de agua (mm) en cuatro tratamientos de riego diseñados para regar el 100%, 85%, 75 y 65% de la ET del maíz menos precipitación.



**Figura 4.** Productividad del agua (Mg/ha-mm) en los cuatro tratamientos de riego.

El modelo HYDRUS-2D predijo los contenidos de agua del suelo en la temporada de crecimiento. El Cuadro 3 muestra el valor CME para comparar las lecturas hechas en el campo con la sonda de neutrones y los resultados del modelo HYDRUS-2D. Los valores CME varían de 0.015 a 0.036  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . Cuanto más bajos sean los valores CME, mejor será el rendimiento del modelo, lo que indica una buena precisión.

**Cuadro 3.** Error cuadrático medio (CME) para evaluar el modelo HYDRUS-2D.

Tratamiento de riego	CME 1	CME 2	CME 3
Trt 1: 100% ET - Rain	0.022	0.020	0.018
Trt 2: 85% ET - Rain	0.021	0.017	0.012
Trt 3: 75% ET - Rain	0.017	0.022	0.027
Trt 4: 65% ET - Rain	0.015	0.033	0.036



Los resultados de la regresión tuvieron pendientes y valores de intersección similares. La Figura 5 muestra los valores de pendiente de las tres repeticiones de los contenidos de agua medidos en el primer tratamiento de riego. Varían de 0.7 a 0.95, y los valores de intersección varían de 0.03 a 0.1  $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ . De manera similar, las tres repeticiones arrojaron valores altos de  $R^2$  (0.96, 0.90, 0.99), lo que indica una fuerte relación entre los resultados previstos y los reales. Las correlaciones indican la fuerte capacidad del modelo para predecir los contenidos de humedad en el suelo ya que demostraron una concordancia razonable en el área de estudio. Los resultados refuerzan el uso de HYDRUS-2D para investigar y diseñar prácticas de gestión de RGS para el maíz.

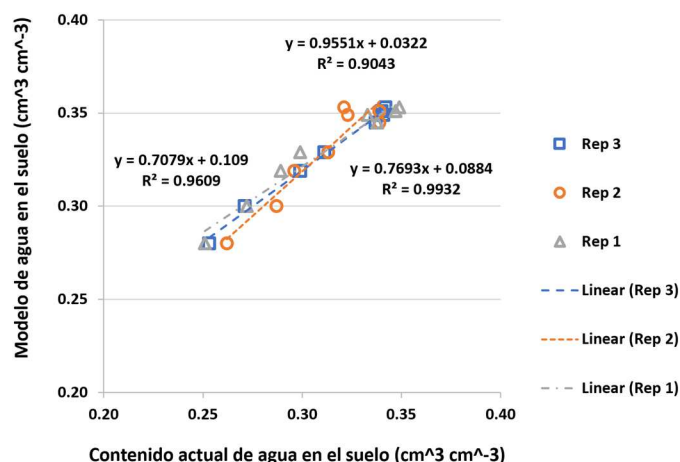


Figura 5. Correlación entre el contenido de agua previsto y el real ( $\Theta$ ).

## Conclusiones

Este estudio evaluó el efecto de cuatro tratamientos de riego por goteo subterráneo (RGS) sobre el rendimiento del maíz de grano, el uso del agua y la productividad del agua. El uso del agua, la productividad del agua y el rendimiento del maíz se vieron ligeramente afectados por las estrategias de riego. Los resultados no demuestran diferencias significativas en el rendimiento del maíz de grano, lo que indica que reemplazar el riego al 75% de ET – precipitación en un año con cantidades razonables de precipitación es una estrategia de riego viable bajo estas condiciones. El modelado numérico es un enfoque rápido y económico para estudiar y optimizar el diseño y las prácticas de manejo de RGS. Se utilizó y se calibró el modelo de simulación HYDRUS-2D. Aunque este estudio se limita al maíz, la metodología aquí presentada se puede aplicar fácilmente para desarrollar diseños y manejos de riego por goteo adecuados para una amplia gama de cultivos. Los resultados respaldan el uso de modelos de simulación de agua del suelo como una herramienta valiosa para los ingenieros en irrigación que deseen modelar la dinámica del agua en el suelo y predecir eventos de riego.

## Agradecimientos

Las autoras desean agradecer el apoyo financiero para este proyecto a la Universidad Estatal de Kansas (Kansas State University) y en especial agradecimiento a los Centros de Extensión e Investigación del Oeste de Kansas (Western Kansas Research and Extension Centers).

## Referencias Bibliográficas

- Bidwell, O. W., E. E. Banbury, W. L. Barker, and G. E. Muilenburg. 1980. The Colby Branch Experiment Station and agriculture in northwest Kansas with special mention of soils. KAES Bulletin 635. Manhattan, Kans.: Kansas Agric. Expt. Sta.
- Camp, C. R. 1998. Subsurface drip irrigation: A review. Trans. ASAE 41(5): 1353-1367.
- Carsel, R. F., & Parrish, R. S. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water resources research, 24(5), 755-769.
- 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.
- Howell, T. A. 2007. Personal communication concerning alfalfa-based reference evapotranspiration. Research leader and Irrigation Engineer, USDA-ARS CPRL, Bushland, Tex, 19.
- Lamm, F. R., and T. P. Trooien. 2003. Subsurface drip irrigation for corn production: A review of 10 years of research in Kansas. Irrig. Sci. 22(3-4): 195-200. Lamm, F. R., and T. P. Trooien. 2005. Dripline depth effects on corn production when crop establishment is nonlimiting. Appl. Eng. in Agric. 21(5): 835-840.
- 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., D. M. O'Brien, and D. H. Rogers. 2020. Using the K-State center pivot sprinkler and SDI economic comparison spreadsheet - 2020. In: Proc. 32nd annual Central Plains Irrigation Conference, Feb. 18-19, 2020, Burlington, Colorado. Available from CPIA, 760 N. Thompson, Colby, Kansas. pp. 135-143. <https://www.ksre.k-state.edu/sdi/reports/2020/LammUsingCPSDI20.pdf>
- 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.
- 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.

- 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., 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.
- 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.
- 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.