

## Influencia de los sistemas de labranza sobre las propiedades hidráulicas y el contenido de humedad en un Argiudol típico de la pampa deprimida. Evaluación de la capacidad predictiva de HYDRUS 1D

### Influence of tillage systems on hydraulic properties and moisture content in a typical Argiudol from the depressed pampas. Evaluation of the predictive capacity of HYDRUS 1D

#### **Luciano Larrieu\***

Mecanización agraria, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata  
<https://orcid.org/0000-0002-9520-158X>

#### **Luis Alberto Lozano**

Laboratorio de Física de Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
<https://orcid.org/0000-0002-7892-0320>

#### **Rafael Villarreal**

Laboratorio de Física de Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
<https://orcid.org/0000-0002-6787-8817>

#### **Daniel Ferro**

Mecanización agraria, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata  
<https://orcid.org/0000-0002-0039-6020>

#### **Matilde Mur**

Mecanización agraria, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata  
<https://orcid.org/0000-0002-6055-2638>

#### **Facundo Guilino**

Mecanización agraria, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata  
<https://orcid.org/0000-0002-2337-3833>

### **Guido Bellora**

Mecanización agraria, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata  
<https://orcid.org/0000-0003-2870-3325>

### **Nicolás Guillermo Polich**

Laboratorio de Física de Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
<https://orcid.org/0000-0003-4975-2337>

### **María Paz Salazar**

Laboratorio de Física de Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
<https://orcid.org/0000-0002-9125-8319>

### **Germán Soracco**

Laboratorio de Física de Suelos, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata; Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
<https://orcid.org/0000-0002-3675-9946>

#### **Revista de la Facultad de Agronomía**

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

**ISSN:** 1669-9513

**Periodicidad:** Continua

vol. 124, 2025

[redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar](mailto:redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar)

**Recepción:** 10 agosto 2023

**Aprobación:** 13 marzo 2025

**Publicación:** noviembre 2025

**URL:** <http://portal.amelica>

**DOI:** <https://doi.org/10.24215/16699513e157>

**\*Autor de correspondencia:** [larrieuluciano@gmail.com](mailto:larrieuluciano@gmail.com)



## **Resumen**

La dinámica hídrica del suelo es influenciada por numerosos factores y su predicción es relevante para la planificación agrícola. Los sistemas de labranza, siembra directa (SD) y labranza convencional (LC), están entre los principales factores de influencia. Sin embargo, sus efectos en la dinámica hídrica son contradictorios según el tipo de suelo e historia productiva. El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la SD y la LC sobre algunas propiedades hidráulicas y la dinámica del contenido de humedad en un suelo Argiudol de la región pampeana, y evaluar la calidad de la modelización con HYDRUS 1D durante una campaña de maíz. El ensayo se realizó en la Chacra Experimental Integrada Chascomús, en parcelas bajo SD y LC con 17 años de antigüedad. Se instalaron sensores de humedad en 4 profundidades. Se midió infiltración ( $q$ ) y conductividad hidráulica mediante infiltrómetro de disco a tres tensiones ( $k_0$ ,  $k_3$  y  $k_6$ ), densidad aparente (DAP) y porosidad total (%PT). A partir de la curva de retención hídrica de cada tratamiento se determinaron los parámetros hidráulicos para la simulación con HYDRUS 1D. La bondad de la simulación se realizó mediante RMSE y  $R^2$ . SD presentó valores significativamente más bajos de  $q$ ,  $K_0$ ,  $K_3$  y  $K_6$ . La DAP y la %PT no se vieron afectados por los sistemas de labranza. El  $R^2$  fue de 0,68 y 0,57 para SD y LC, respectivamente, y los valores de RMSE fueron de 0,09 y 0,18 mm, respectivamente para la lámina (mm) de 0-40 cm.

**Palabras clave:** dinámica hídrica, siembra directa, labranza convencional.

## **Abstract**

The soil water dynamic is influenced by numerous factors, and its prediction is relevant for agricultural planning. Tillage systems, such as no-till (SD) and conventional tillage (LC), are among the main influencing factors. However, its effects on water dynamics are contradictory depending on the type of soil and productive history. The objective of this study was to determine the effect of SD and LC on some hydraulic properties and soil moisture dynamics in an Argiudol soil of the Pampas region, and to evaluate the quality of the modeling with HYDRUS 1D during a corn campaign. The trial was carried out in the Chascomús Integrated Experimental Farm, in plots under SD and LC with 17 years old. Moisture sensors were installed at 4 depths. Infiltration ( $q$ ) and hydraulic conductivity were measured using a disc infiltrometer at three stresses ( $k_0$ ,  $k_3$  and  $k_6$ ), bulk density (DAP) and total porosity (%PT). Hydraulic parameters for HYDRUS 1D simulation were determined from the water retention curve of each treatment. The goodness of simulation was performed using RMSE and  $R^2$ . SD showed significantly lower values of  $q$ ,  $K_0$ ,  $K_3$  and  $K_6$ . The DAP and the %PT were not affected by the tillage systems. The  $R^2$  was 0.68 and 0.57 for SD and LC, respectively, and the RMSE values were 0.09 and 0.18 mm, respectively for the 0-40 cm slice (mm).

**Keywords:** hydric dynamics, no-till, conventional tillage.

## INTRODUCCIÓN

El agua del suelo y su dinámica son fundamentales para la agricultura (de Queiroz et al., 2020). Sin embargo, su medición en el campo suele presentar limitaciones, por lo que su predicción es necesaria para diversas actividades de planificación agrícola e investigación (Rizzo et al., 2022). Son múltiples los factores que inciden en la dinámica del contenido hídrico del suelo. Entre los factores que condicionan esa dinámica se encuentran los asociados al cultivo, a las condiciones atmosféricas, y aquellos que dependen de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo (Sarmiento Herrera et al., 2022). Los factores asociados al suelo son principalmente afectados por el sistema de labranza elegido (De Almeida et al., 2018).

En las últimas décadas, el reemplazo de la labranza convencional (LC) por la siembra directa (SD) produjo cambios en la configuración del sistema poroso del suelo afectando el movimiento y distribución de agua en el perfil (Soracco et al., 2010; Lozano et al., 2016). No obstante, los efectos de los sistemas de labranza sobre las propiedades físicas son contrastantes según el tipo de suelo, el clima y la historia de cultivo (Talukder et al., 2023).

Haruna et al. (2018) determinaron que la densidad aparente (DAP) fue un 13 % mayor en SD frente a LC en un estudio que incluyó cultivos de cobertura invernales en suelos franco-limosos. Estos autores reportaron que la SD presentó una conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) 87 % mayor respecto de LC. Por el contrario, Villarreal et al. (2020) indicaron que los suelos bajo LC muestran mayor  $K_s$  en comparación con SD, especialmente en texturas limosas. Recientemente, Xue et al. (2023) trabajando sobre cultivos anuales de invierno, informaron que la SD en barbecho presentó porosidad total (PT) significativamente mayor frente a la LC en un suelo arcillo-limoso. Por el contrario, Pires et al. (2024) encontraron valores menores de PT en SD en un oxisol arcilloso.

Sasal et al. (2006) reportaron que la SD produjo aumento de la PT y una menor tasa de infiltración ( $q$ ) frente a la LC, en suelos franco limoso de la región pampeana. Blanco-Canqui y Ruis (2020) indicaron que en general la SD tuvo efectos mixtos sobre la DAP pero produjo mayores valores de  $q$ , en una revisión que abarcó suelos diversos. Recientemente, Mondal y Chakraborty (2022) realizaron un metaanálisis y concluyeron que en la mayoría de los casos la SD redujo significativamente la PT y la  $K_s$  frente a LC.

En ambientes de llanuras como los de la región pampeana predominan los movimientos verticales del agua, es decir precipitación y evapotranspiración, sobre los horizontales como escurrimiento superficial y profundo (Scarpati y Capriolo, 2013). Por lo tanto, el estudio del movimiento vertical en la zona no saturada es clave para representar la dinámica de estos ambientes (García et al., 2018).

La predicción de la dinámica del contenido de humedad del suelo tiene relevancia en el modelado hidrológico, el manejo de cuencas y cultivos, entre otras aplicaciones (Qiu et al., 2010). Sin embargo, existen una serie de variables de importancia para la predicción hídrica que requieren una red de medición de información hidrológica confiable en su calidad y con un razonable período de registros, lo cual no es frecuente en algunos sectores de la llanura pampeana (Flores y Ruiz, 1998; Rodríguez Vagaría et al., 2014). En este contexto, los modelos de simulación se posicionan como una alternativa para inferir la evolución de la humedad edáfica durante el ciclo del cultivo, además de permitir plantear escenarios futuros (Llovet, 2014).

HYDRUS 1D (Šimůnek y Hopmans, 2009) es un software ampliamente aceptado y validado que permite la simulación y análisis unidimensional del flujo de agua en medios porosos saturados e insaturados. Utiliza como datos de entrada propiedades del suelo como  $K_s$ , y parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica, y requiere definir las condiciones iniciales y de contorno para la simulación.

Rodríguez Guerra (2016) menciona que la aplicación del HYDRUS 1D permite conocer los procesos de infiltración y evaporación en el suelo. Este autor encontró buenos resultados utilizando el código HYDRUS 1D en la predicción de la humedad del suelo con diferente cobertura forestal. También fue utilizado con éxito en numerosas situaciones (Siltecho et al., 2015; Amaya, 2022 y Wang et al., 2022). Chakraborty et al. (2022) reportaron que HYDRUS 1D simuló satisfactoriamente los valores de contenido de humedad del suelo en ensayos con diferentes manejos. Estos autores compararon los valores simulados versus observados a campo utilizando el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el error cuadrático medio (RMSE) para validar el modelo, reportando valores de  $R^2$  de 0,57 a 0,93 y valores de RMSE en rangos entre 0,03 y 0,08 ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ). Rangos similares fueron informados por otros autores (Li et al., 2014; Ventrella et al., 2019). Por su parte, Therani et al. (2023) utilizaron HYDRUS 1D para optimizar el riego en viveros de nogal en zonas áridas y semiáridas reportando valores de  $\text{RMSE} = 0,025 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Rubio et al. (2005) en suelos franco limosos encontraron que la bondad de la simulación disminuye con la profundidad. A su vez, reportaron retrasos en la predicción de la humedad posteriores a periodos secos prolongados, atribuyendo este

comportamiento a la formación de grietas y vías preferenciales en el suelo que no son tenidas en cuenta por el modelo. Hartmann et al. (2012) evaluaron el efecto de la labranza y la compactación del suelo en el balance hídrico simulado con HYDRUS 1D encontrando valores de  $R^2$  de 0,34 a 0,63.

De los antecedentes mencionados surge la importancia de estudiar cómo los sistemas de labranza afectan las propiedades hidráulicas de un Argiudol y la capacidad del software HYDRUS 1D para predecir los cambios en la dinámica de la humedad del suelo inducidos por estos manejos.

Las hipótesis que se plantearon fueron que los sistemas de labranza afectan las propiedades hidráulicas de un Argiudol de la región pampeana presentando la SD menor  $K_s$  que la LC, lo cual modifica la dinámica del contenido de humedad del suelo y el software HYDRUS 1D es capaz de predecir dicha modificación con un correcto ajuste de los valores medidos y predichos de humedad.

El objetivo de este trabajo fue determinar el efecto de la SD y la LC sobre algunas propiedades hidráulicas y la dinámica del contenido de humedad en un suelo Argiudol de la región pampeana, y evaluar la calidad de la modelización con HYDRUS 1D durante una campaña de maíz.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDIO

El ensayo se realizó en la Chacra Experimental Integrada Chascomús (INTA-MAA), ubicada en cercanías de la localidad de Chascomús. El suelo es un Argiudol abruptico, fino, illítico, térmico (Soil Survey Staff, 2010) correspondiente con la serie Udaondo (INTA, 1989). Su horizonte A tiene textura franca con 29,8 % de arcilla y 45,9 % de limo. El clima de la región es templado cálido con precipitaciones distribuidas a lo largo de todo el año en el orden de los 1000 mm anuales, concentrándose las máximas en verano y otoño (56%) y la mínima en invierno (con el 18%), el mes más cálido es enero, con una temperatura máxima promedio de 29,5°C y mínima de 19,9°C. El mes más frío es julio, con una temperatura máxima promedio de 13,2°C y mínima de 7,7°C.

### Tratamientos y determinaciones

El estudio se llevó a cabo en un ensayo de larga duración que al momento del muestreo tenía 17 años de antigüedad, con un diseño experimental al azar. Los lotes están ubicados en las coordenadas 35°44' S, 58°03' O. Los tratamientos consistieron en diferentes sistemas de labranza: a) siembra directa (SD), y b) labranza convencional (LC). La LC consiste en una pasada con arado de discos (20 cm de profundidad), y un refinado posterior con rastra de dientes. Los cultivos han sido principalmente maíz, eventualmente soja. El muestreo se llevó a cabo en parcelas adyacentes de 30 m de ancho por 50 m de largo por tratamiento, ubicados en la misma posición del paisaje. Para el ensayo se implantó maíz como cultivo de verano, con siembra el 11 de octubre del 2016 y cosecha el 10 de marzo del 2017.

### Medición de la humedad

Durante el ciclo de cultivo del maíz el contenido de humedad del suelo fue medido usando cuatro sensores (EC-5 sensor, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, USA) ubicados a 5, 15, 25 y 35 cm de profundidad, conectados a un *datalogger* (Em50 *datalogger*, Decagon Devices Inc., Pullman, Washington, USA) en cada tratamiento. Previamente se realizó la calibración de los sensores para este suelo siguiendo las instrucciones del fabricante.

### Infiltración

Con el fin de detectar cambios en las propiedades hidráulicas del suelo y su impacto en la dinámica del agua se determinó la infiltración a campo a través del infiltrómetro de disco a tensión (Perroux y White, 1988) previo a la siembra del maíz, luego de la labranza en el tratamiento LC. Se realizaron 4 repeticiones por tratamiento en sitios elegidos al azar, evitando las hileras de cultivo y huellas visibles de maquinaria. Para considerar únicamente el efecto del manejo, los residuos del cultivo fueron removidos de la superficie. Se esparció una fina capa de arena seca para asegurar un buen contacto hidráulico. Se midió infiltración a tres tensiones de entrega de agua,  $h$  (-6, -3, y 0 cm, aplicadas en este orden y en el mismo lugar). Se monitoreó el flujo hasta alcanzar el estado estacionario. La infiltración acumulada se registró cada minuto hasta los 10 min, cada 5 min hasta los 30 min, y cada 10 min hasta el fin del ensayo. Cuando la tasa de infiltración no cambió en cuatro mediciones tomadas a 10 min, se asumió flujo estacionario, y la tasa de infiltración se calculó en base a estas últimas cuatro mediciones. A partir de las tasas de infiltración a las tres tensiones se calcularon las conductividades hidráulicas a 0, 3 y 6 cm de tensión ( $K_0$ ,  $K_3$  y  $K_6$ , respectivamente) utilizando el método de las cargas múltiples (Ankeny et al., 1991).

### Densidad aparente y porosidad total

Se extrajeron 5 muestras de suelo en cilindros de acero inoxidable de 7,5 cm de diámetro interno y 10 cm de altura en cada tratamiento en el mismo momento de los ensayos de infiltración. Se determinó la DAP a partir de la siguiente ecuación (Hillel, 1998):

$$DAP = \frac{m}{VT} \quad (1)$$

Donde m es la masa seca en estufa a 105°C durante 48 horas y VT es el volumen de la muestra. A partir de los valores de DAP, se calculó la PT del suelo (%):

$$PT(\%) = 100 \times \left[ 1 - \left( \frac{DAP}{D_{real}} \right) \right] \quad (2)$$

Donde D real es la densidad real del suelo determinada con picnometría, y para este suelo tuvo un valor promedio de 2,34 Mg m<sup>-3</sup>.

### MODELIZACIÓN CON HYDRUS 1D

#### Parámetros hidráulicos del suelo

Los parámetros utilizados para la modelización se obtuvieron a partir de la curva de retención hídrica del suelo para cada uno de los tratamientos. Para ello, se extrajeron 10 muestras indisturbadas de suelo en cilindros de acero inoxidable de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura (volumen, 98 cm<sup>3</sup>) en cada tratamiento. Dichas muestras se llevaron hasta saturación y se las sometió a distintas cargas hidráulicas (-0,1 m, -0,3 m, -0,5 m, -0,7 m y -1 m en mesa de tensión, y -3 m y -150 m en olla de Richard).

Los valores de contenido de humedad en función de la carga hidráulica (h) fueron ajustados a la ecuación de van Genuchten, utilizando el código RETC (van Genuchten et al., 1991):

$$\frac{\theta(h) - \theta_r}{(\theta_s - \theta_r)} = \frac{1}{(1 + |\alpha h|)^n)^m} \quad (3)$$

Donde  $\theta_r$  y  $\theta_s$  representan el contenido de agua residual y saturado, respectivamente [L<sup>3</sup>L<sup>-3</sup>], y  $\alpha$  [L<sup>-1</sup>], n, y m son parámetros de ajuste, siendo  $m = 1 - 1/n$  (Mualem, 1976).

#### Simulación con Hydrus 1D

La simulación se corresponde con el periodo ocupado por el cultivo de maíz, desde la siembra hasta la fecha de cosecha, con un intervalo de tiempo diario. El perfil de suelo se consideró homogéneo desde superficie hasta los 40 cm de profundidad. Utilizando el software RETC (Van Genuchten et al., 1991) a partir de los datos obtenidos de la curva de retención hídrica para cada uno de los tratamientos se determinaron los parámetros de ajuste de la ecuación 3.

Como condiciones de contorno se utilizaron datos de precipitación y de temperatura máxima y mínima diaria provenientes de la estación meteorológica ubicada en la chacra experimental donde se realizó el estudio. Con esta información se definieron las condiciones de contorno variables y se calculó la evapotranspiración mediante la fórmula de Hargreaves y Samani (1985) incluida en HYDRUS-1D.

Así, se estimaron las humedades volumétricas (cm<sup>3</sup> cm<sup>-3</sup>) en cuatro profundidades coincidentes con la ubicación de los sensores de humedad.

#### Análisis estadístico y bondad de la simulación

Se utilizó el análisis de la varianza (ANOVA) para determinar si hubo efecto significativo del factor tratamiento sobre las propiedades físicas del suelo. La diferencia entre medias se analizó con el test de Tukey (p<0,05).

Para determinar la bondad de la estimación de los valores de humedad con HYDRUS se utilizaron la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>).

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

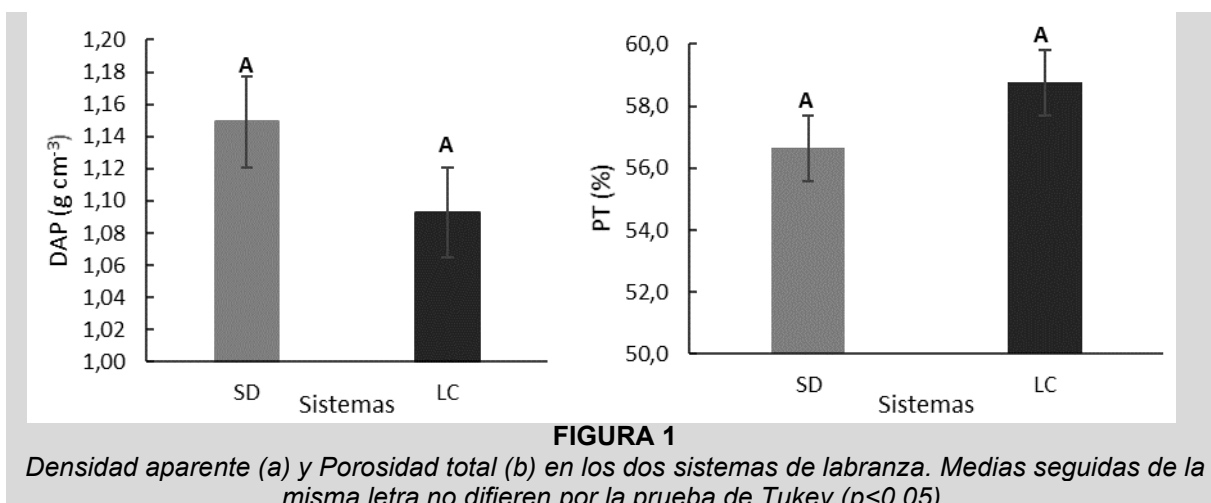
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_m)^2}$$

Donde n es el número de observaciones,  $P_i$  son los valores simulados,  $O_i$  son los valores observados y  $O_m$  es la media de los valores observados.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

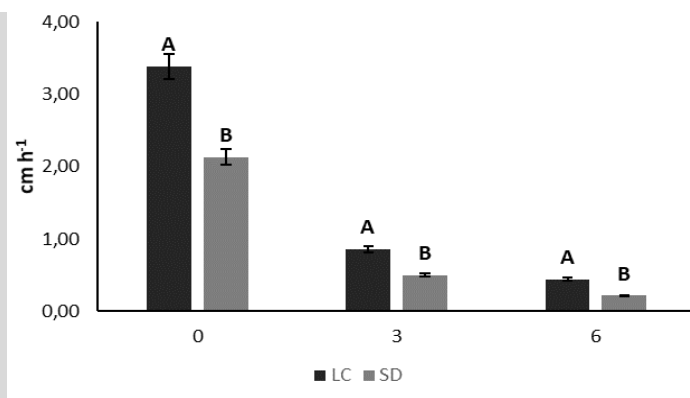
### DENSIDAD APARENTE Y POROSIDAD TOTAL

En la Figura 1 se muestran los valores de DAP y PT de los tratamientos evaluados. No hubo diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ). Esto indica que la LC, aun cuando presentó menores valores de DAP, lo cual coincide con varios reportes (Haruna et al., 2018 y Xue et al., 2023), no tuvo un efecto significativo al momento del muestreo. Villarreal et al. (2020) indica que la porosidad total y la densidad aparente en general, no son los indicadores sensibles para detectar el efecto de las labranzas en el suelo.



### Conductividad hidráulica a distintas tensiones

La Figura 2 muestra los resultados de  $K_0$ ,  $K_3$  y  $K_6$  derivados de las mediciones realizadas a campo mediante infiltrómetros de discos, con 4 repeticiones por tratamiento.



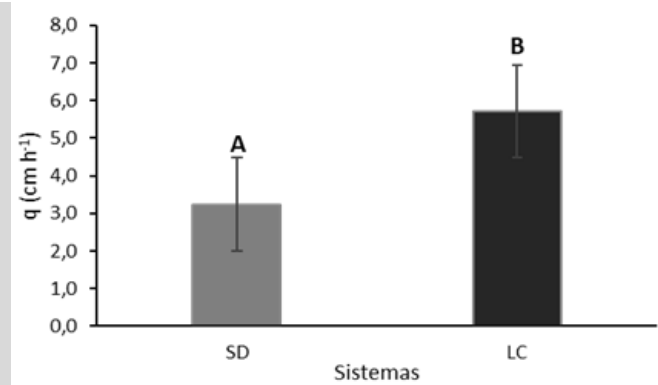
**FIGURA 2**

Conductividad hidráulica con 0 cm, 3 cm y 6 cm de tensión para los dos sistemas de labranza. Letras diferentes significan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

Valores significativamente mayores de  $K_s$  en LC frente a SD fueron notificados por Villarreal et al. (2020). Lozano et al. (2016) reportaron que la conductividad hidráulica de un suelo dependerá de las características de su sistema poroso. Se puede afirmar que poros de mayor diámetro, con mayor continuidad y orientados en el sentido del flujo de agua, resultarán en una mayor conductividad hidráulica saturada.

### Infiltración

La Figura 3 muestra los resultados de la infiltración derivada de las mediciones realizados a campo mediante infiltrómetros de discos, con 4 repeticiones por tratamiento. En SD se registraron valores de  $5,71 \text{ cm h}^{-1}$  en promedio mientras que la LC  $3,24 \text{ cm h}^{-1}$ .



**FIGURA 3**

Infiltración en los dos sistemas de labranza. Letras diferentes significan diferencias significativas ( $p < 0,05$ ).

La SD posee una tasa de infiltración significativamente más baja que la LC. Estos resultados son determinantes en la entrada de agua al perfil y concuerdan con los reportados por Díaz-Zorita et al. (2002) y Haruna et al. (2018). Sasal et al. (2006) y Álvarez et al. (2009) reportaron que la entrada de agua al perfil bajo SD se vio reducida significativamente debido al cambio en la orientación de los poros formados como consecuencia del tráfico repetido del suelo y formación de estructuras laminares.

### Parámetros de ajuste de la curva de retención hídrica

La Tabla 1 muestra los parámetros de ajuste del modelo de van Genuchten de la curva de retención hídrica obtenidos mediante el software RETC. Estos son los parámetros de entrada que luego se utilizaron en la simulación con HYDRUS 1D.

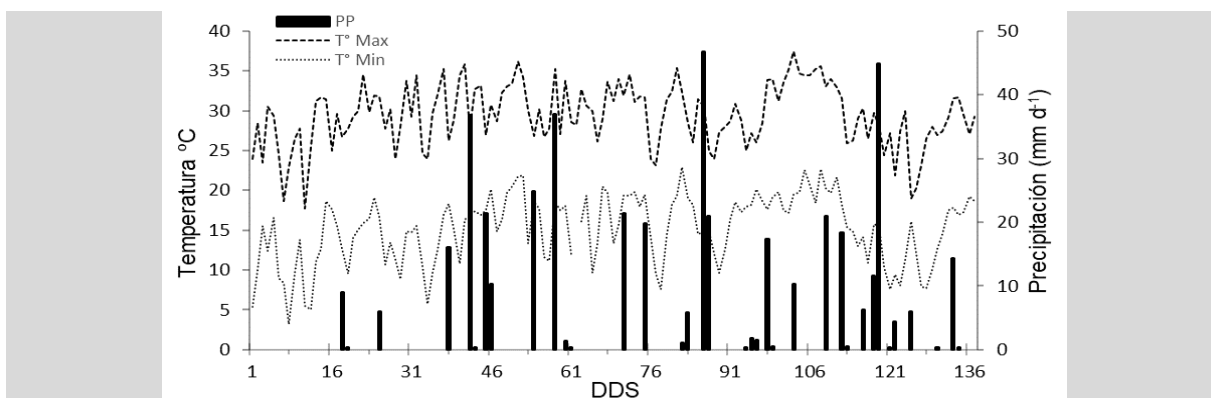
**TABLA 1**  
*Parámetros de ajuste del modelo de Van Genuchten para los dos sistemas de labranza (siembra directa, SD, y labranza convencional, LC). Letras diferentes indican diferencias significativas entre los sistemas de labranza para cada variable ( $p < 0,05$ ).*

	SD	LC
Theta S	0,50 (A)	0,53 (A)
Alfa (cm <sup>-1</sup> )	0,11 (A)	0,41 (B)
n	1,16 (A)	1,14 (A)

En el presente estudio los sistemas de labranza produjeron cambios en las propiedades hidráulicas utilizadas en la simulación con HYDRUS 1D. Soracco et al. (2010) informaron que el reemplazo de la LC por SD produjo cambios en la configuración del sistema poroso del suelo afectando el movimiento y distribución de agua en el perfil.

### Simulaciones

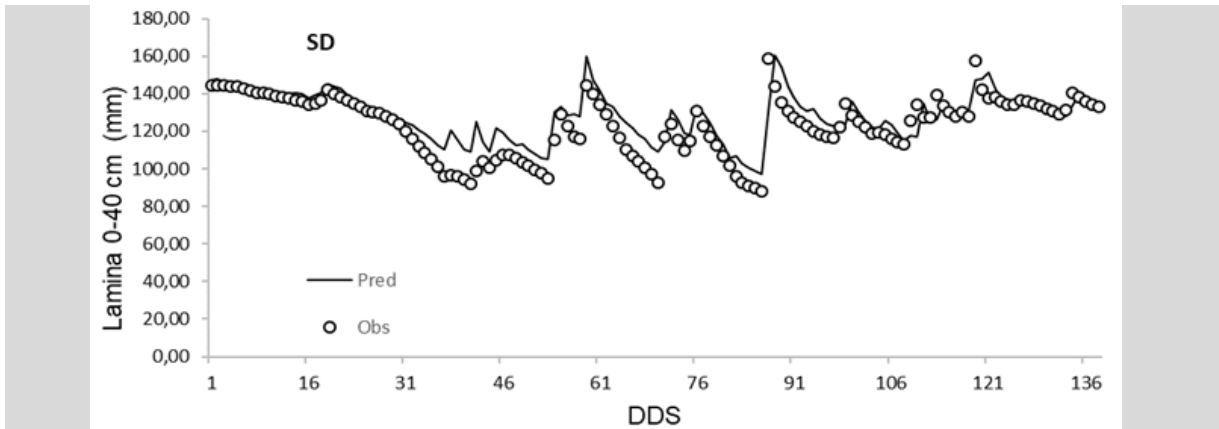
Los datos de precipitación, temperatura mínima y máxima diaria en el sitio durante el ciclo de cultivo estudiado se presentan en la Figura 3. Esta información se utilizó para definir las condiciones de contorno superior en la simulación con HYDRUS 1D.



**FIGURA 4**

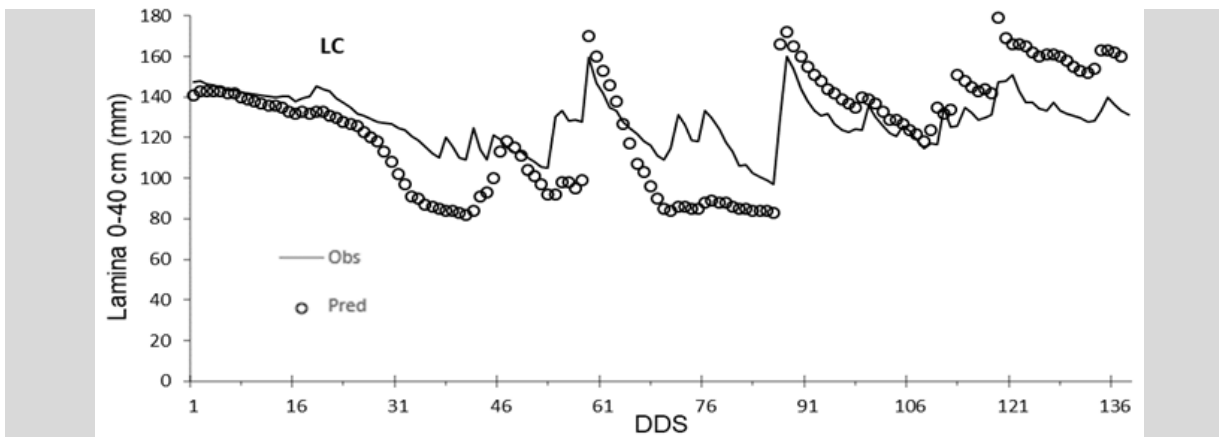
*Temperatura máxima y mínima, y precipitaciones en función de los días desde la siembra (DDS) en el sitio de estudio.*

En las Figura 5 y Figura 6 se puede observar el contenido de agua del suelo, expresado en lámina (mm) medido y estimado para SD y LC, respectivamente, hasta los 40 cm de profundidad del perfil bajo estudio para el periodo analizado.



**FIGURA 5**

Humedad observada y predicha expresada como lámina acumulada en los primeros 40 cm de perfil del suelo (mm) en el horizonte superficial para siembra directa, en función de días desde la siembra (DDS).



**FIGURA 6**

Humedad observada y predicha expresada como lámina acumulada en los primeros 40 cm de perfil del suelo (mm) en el horizonte superficial para labranza convencional, en función de días desde la siembra (DDS).

En las Figuras 5 y 6 se observa que en SD hubo un mejor ajuste que en LC entre los datos observados y los predichos para el periodo analizado. Ello posiblemente sea consecuencia de la formación de vías preferenciales producto de la labranza del suelo en LC.

La correcta relación temporal entre resultados estimados versus medidos en el presente estudio concuerda con los reportados por Hartmann et al. (2012). Sin embargo, se puede observar que durante periodos de escasa humedad luego de una precipitación, los valores predichos son mayores a los medidos, es decir que el modelo en esos periodos sobrestima los contenidos de humedad. Por otro lado, luego de una precipitación los valores observados aumentan rápidamente por encima de lo que lo hacen los valores predichos, especialmente en LC. Es decir que el modelo subestima el efecto de las precipitaciones en el contenido de humedad del horizonte superficial. Este hecho es más notorio en LC que en SD y posiblemente sea consecuencia del agrietamiento del suelo que genera vías preferenciales de flujo de agua que no son consideradas en la simulación (Rubio et al., 2005).

### Bondad de la estimación

La Tabla 2 muestra los valores de los parámetros de ajuste entre los contenidos predichos y observados de humedad ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) para las distintas capas (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, y 30-40 cm) para LC y SD.

**TABLA 2**  
*Valores de los parámetros de ajuste entre los contenidos predichos y observados de humedad ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) para las distintas capas (0-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm, y 30-40 cm) para LC y SD.*

Profundidad	R <sup>2</sup>		RMSE ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ )	
	SD	LC	SD	LC
0-10	0,33	0,34	0,05	0,09
10-20	0,38	0,78	0,04	0,03
20-30	0,66	0,62	0,05	0,03
30-40	0,12	0,13	0,10	0,11

Para la lámina acumulada (mm) en los 40 cm de profundidad los valores de R<sup>2</sup> fueron de 0,68 y 0,57 para SD y LC, respectivamente, y los valores de RMSE fueron de 0,09 y 0,18 mm, respectivamente. Estos valores concuerdan con los reportados por Chakraborty et al. (2022) quienes informaron valores de R<sup>2</sup> de 0,57 a 0,93. A su vez, el valor de RMSE en SD está en el mismo rango informado por dichos autores. Sin embargo, el valor de RMSE para LC está muy por arriba del rango antes mencionado.

Los resultados de R<sup>2</sup> del presente trabajo concuerda con los informados por Rodríguez Guerra (2016); Hartmann et al. (2012); Siltecho et al. (2015); Amaya (2022) y Wang et al. (2022) quienes informaron que HYDRUS 1D permite predecir correctamente la humedad del suelo.

Se puede observar que, tanto para SD como para LC en el estrato superficial (0-10 cm) los resultados de R<sup>2</sup> son ligeramente menores a los informados por Rubio et al. (2005) y Hartmann et al. (2012) para la capa superficial (0-20 cm). Estos autores también informaron valores de R<sup>2</sup> bajos en profundidad del perfil.

### CONCLUSIÓN

Los sistemas de labranza siembra directa y labranza convencional producen diferencias en las propiedades hidráulicas del suelo, teniendo la SD menores valores de  $q$ ,  $K_0$ ,  $K_3$  y  $K_6$ . La DAP y la %PT no se vieron afectados por los sistemas de labranza.

El software HYDRUS-1D es capaz de predecir los valores de humedad con una bondad de ajuste aceptable.

## Contribución de los autores

Referencias. 1-administración del proyecto, 2-adquisición de fondos, 3-análisis formal, 4-conceptualización, 5-curadoría de datos, 6-escritura, revisión y edición, 7-investigación, 8-metodología, 9-recursos, 10-redacción, borrador original, 11-software, 12-supervisión, 13-validación, 14-visualización.

Nombre del autor	Colaboración académica													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Luciano Larrieu			X	X	X	X	X	X		X	X		X	X
Luís Alberto Lozano			X	X	X	X	X		X	X		X	X	X
Rafael Villarreal			X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X
Daniel Ferro				X			X	X						
Matilde Mur				X			X	X						
Facundo Guilino				X			X	X						
Guido Bellora				X			X	X						
Nicolas Polich				X			X	X						
María Paz Salzar			X	X	X	X		X		X	X			X
Germán Soracco	X	X		X					X	X		X	X	X

## REFERENCIAS

- Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Boem, F. H. G., Bono, A., Fernandez, P. L. y Prystupa, P. (2009). Topsoil properties as affected by tillage systems in the rolling pampa region of Argentina. *Soil Science Society of America Journal*, 73(4), 1242–1250. <https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0246>
- Amaya, K. L. L. (2022). Evaluación de la dinámica de agua en Hydrus-1D para tres suelos de ladera cultivados con aguacate Hass (*Persea americana*) en el Valle del Cauca, Colombia. *Investigación e Innovación en Ingenierías*, 10(1), 75-98. <https://doi.org/10.17081/invinno.10.1.4811>
- Ankeny, M. D., Ahmed, M., Kaspar, T. C. y Horton, R. (1991). Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 467-470. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020028x>
- Blanco-Canqui, H. y Ruis, S. J. (2020). Cover crop impacts on soil physical properties: A review. *Soil Science Society of America Journal*, 84(5), 1527-1576. <https://doi.org/10.1002/saj2.20129>
- Chakraborty, P., Singh, J., Singh, N. y Kumar, S. (2022). Assessing the influence of cover crop on soil water dynamics using soil moisture measurements and hydrus-1D Simulations. *Soil Science Society of America Journal*, 86(6), 1538-1552. <https://doi.org/10.1002/saj2.20477>
- de Almeida, W. S., Panachuki, E., de Oliveira, P. T. S., da Silva Menezes, R., Sobrinho, T. A. y de Carvalho, D. F. (2018). Effect of soil tillage and vegetal cover on soil water infiltration. *Soil and Tillage Research*, 175, 130-138. <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.07.009>
- de Queiroz, M. G., Freire da Silva, T. G., Zolnier, S., da Rosa Ferraz Jardim, A. M., de Alves Souza, C. A., do Nascimento Araújo Júnior, G., Florentino de Moraes, J. E. y Bastos de Souza, L. S. (2020). Spatial and temporal dynamics of soil moisture for surfaces with a change in land use in the semi-arid region of Brazil. *CATENA*, 188. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104457>
- Díaz-Zorita, M., Duarte, G. A. y Grove, J. H. (2002). A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 65(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(01\)00274-4](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00274-4)
- Flores, H. E. y Ruíz, J. A. (1998). Estimación de la humedad del suelo para maíz de temporal mediante un balance hídrico. *Terra Latinoamericana*, 16(3), 219-229.
- García, P. E., Badano, N. D., Menéndez, A. N., Bert, F., García, G., Podestá, G., y Arora, P. (2018). Influencia de los cambios en el uso del suelo y la precipitación sobre la dinámica hídrica de una cuenca de llanura extensa. Caso de estudio: Cuenca del Río Salado, Buenos Aires, Argentina. *Ribagua*, 5(2), 92-106. <https://doi.org/10.1080/23863781.2018.1495990>
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>
- Hartmann, P., Zink, A., Fleige, H. y Horn, R. (2012). Effect of compaction, tillage and climate change on soil water balance of Arable Luvisols in Northwest Germany. *Soil and Tillage Research*, 124, 211-218. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.004>

- Haruna, S. I., Anderson, S. H., Nkongolo, N. V. y Zaibon, S.** (2018). Soil hydraulic properties: influence of tillage and cover crops. *Pedosphere*, 28(3), 430–442. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60387-4](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60387-4)
- Hillel, D.** (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Academic Press.
- Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria** (1989). *Descripción de Cartas de Suelo de la Provincia de Buenos Aires*. Ediciones INTA.
- Li, Y., Šimýnek, J., Jing, L., Zhang, Z. y Ni, L.** (2014). Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D. *Agricultural Water Management*, 142,38-46. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.04.021>
- Llovet, J. A.** (2014). *Balance hídrico del cultivo de soja Glycine max (L.) Merr. en suelos de diferente textura del norte bonaerense: ajuste de herramientas modelizadoras* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Rosario]. <https://rehip.unr.edu.ar/items/76e96294-3f1d-49e3-addd-612d04fd0c9a>
- Lozano, L. A., Soracco, C. G., Villarreal, R., Ressia, J. M., Sarli, G. O. y Filgueira, R. R.** (2016). Soil physical quality and soybean yield as affected by chiseling and subsoiling of a no-till soil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 40(1), e0150160. <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150160>
- Mondal, S. y Chakraborty, D.** (2022). Global meta-analysis suggests that no-tillage favourably changes soil structure and porosity. *Geoderma*, 405, 115443. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115443>
- Mualem, Y.** (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, 12(3), 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>
- Perroux, K. M. y White, I.** (1988). Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal*, 52(5), 1205-1215. <https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200050001x>
- Pires, L. F., Ghanbarian, B. y Lin, Q.** (2024). Physical, topological and hydraulic properties of an Oxisol under conservation practices: X-ray tomography imaging and pore-network simulation. *Soil and Tillage Research*, 239, 106055. <https://doi.org/10.1016/j.still.2024.106055>
- Qiu, Y., Fu, B., Wang, J., Chen, L., Meng, Q. y Zhang, Y.** (2010). Spatial prediction of soil moisture content using multiple linear regressions in a gully catchment of the Loess Plateau, China. *Journal of Arid Environments*, 73(2), 208–220. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.08.003>
- Rizzo, T. P., Villatoro, M., Alvarado, A., Granados, V. C. y Pérez, D. P.** (2022). Estimación de la humedad del suelo mediante regresiones lineales múltiples en Llano Brenes, Costa Rica. *Agronomía Mesoamericana*, 33(2), 26-27. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.47872>
- Rodríguez Guerra, E. C.** (2016). *La afectación vegetal en el balance hídrico de los suelos en la subcuenca hidrográfica del río Agua Salud de Panamá* [Tesis de doctorado no publicada]. Universidad de Panamá.
- Rodríguez Vagaría, A., Deluchi, M., Kruse, E. y Gaspari, F.** (23-26 de septiembre de 2014). *Caudal básico y su influencia en el balance hidrológico en un área de llanura* [Conferencia]. II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras. Universidad Nacional de Litoral. Santa Fe, Argentina. <https://digital.cic.gba.gob.ar/items/a474db94-f3cb-4171-be6e-c58f3f9e33ad>
- Rubio, C., Llorens, P. y Van Genuchten, M. T.** (2005). Modelización del flujo transitorio en suelos franco-limosos utilizando HYDRUS-1D. En S. Calvete y A. Paz González (Comps.), *Estudios de la zona no saturada del suelo Vol. VII* (pp. 257-261). LLAR Digital.
- Sarmiento-Herrera, N., Ramírez-Carabalí, C., García-López, J. C., Hincapié-Velásquez, K. A. y Orozco-Jaramillo, D.** (2022). Aplicativo de balance hídrico para el cultivo de café en Colombia. *Avances Técnicos Cenicafe*, 539, 1-8. <https://doi.org/10.38141/10779/0539>
- Sasal, M. C., Andriulo, A. E. y Taboada, M. A.** (2006). Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*, 87(1), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.025>
- Scarpati, O. E. y Capriolo, A. D.** (2013). Sequías e inundaciones en la provincia de Buenos Aires (Argentina) y su distribución espacio-temporal. *Investigaciones Geográficas*, 82, 38-51.
- Siltecho, S., Hammecker, C., Sriboonlue, V., Clermont-Dauphin, C., Trelo-Ges, V., Antonino, A. C. D. y Angulo-Jaramillo, R.** (2015). Use of field and laboratory methods for estimating unsaturated hydraulic properties under different land uses. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(3), 1193-1207. <https://doi.org/10.5194/hess-19-1193-2015>
- Simunek, J. y Hopmans, J. W.** (2009). Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological Modelling*, 220(4), 505-521. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004>
- Soil Survey Staff** (2010). *Keys to soil taxonomy*. (11<sup>a</sup> ed.). United States Department of Agriculture.

- Soracco, C.G., Lozano, L. A., Sarli, G. O., Gelati, P. R. y Filgueira, R. R.** (2010). Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil and Tillage Research*, 109(1), 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.013>
- Talukder, R., Plaza-Bonilla, D., Cantero-Martínez, C., Wendroth, O. y Lampurlanés, J.** (2023). Soil hydraulic properties and pore dynamics under different tillage and irrigated crop sequences. *Geoderma*, 430, 116293. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116293>
- Tehrani, A., Ziaei, A. N. y Naghedifar, S. M.** (2023). Irrigation scheduling of walnut seedlings using HYDRUS-1D and Taguchi optimization approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 149(1), 04022045. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0001735](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001735)
- Van Genuchten, M. T., Leij, F. J. y Yates, S. R.** (1991). The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0. EPA Report 600/2-91/065. U.S. Environmental Protection Agency.
- Ventrella, D., Castellini, M., Di Prima, S., Garofalo, P. y Lassabatère, L.** (2019). Assessment of the physically-based HYDRUS-1D model for simulating the water fluxes of a Mediterranean cropping system. *Water*, 11(8), 1657. <https://doi.org/10.3390/w11081657>
- Villarreal, R., Lozano, L. A., Salazar, M. P., Bellora, G. L., Melani, E. M., Polich, N. y Soracco, C. G.** (2020). Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region. *Soil and Tillage Research*, 198, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.104528>
- Wang, H., Zhu, X., Zakari, S., Chen, C., Liu, W. y Jiang, X. J.** (2022). Assessing the effects of plant roots on soil water infiltration using Dyes and Hydrus-1D. *Forests*, 13(7), 1095. <https://doi.org/10.3390/f13071095>
- Xue, J. F., Qi, Z. W., Chen, J. L., Cui, W. H., Lin, W. y Gao, Z. Q.** (2023). Dynamic of soil porosity and water content under tillage during summer fallow in the dryland wheat fields of the Loess Plateau in China. *Land*, 12(1), 230. <https://doi.org/10.3390/land12010230>