

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA SATURADA DETERMINADA POR DISTINTOS PROCEDIMIENTOS EN SUELOS CON ALTA HUMEDAD INICIAL

MARIO GUILLERMO CASTIGLION^{1*}, FILIPE BEHRENDIS KRAEMER¹⁻²,
JOHN JAIRO MARQUEZ MOLINA¹

Recibido: 06/08/2018

Recibido con revisiones: 04/10/2018

Aceptado: 04/10/2018

RESUMEN

La conductividad hidráulica saturada (K_s) ejerce una fuerte influencia sobre la partición de la lluvia en infiltración y escurrimiento. Una correcta estimación de esta propiedad es importante para poder modelar de manera realista los procesos hidrológicos y de erosión que ocurren en el suelo. Los objetivos del presente trabajo fueron: Comparar los resultados de K_s obtenidos en suelos bajo agricultura con alta humedad inicial y ubicados en dos posiciones del paisaje (loma y media loma), determinados mediante distintos procedimientos de campo y de laboratorio, analizando a su vez la incidencia que tienen otras propiedades físicas edáficas sobre dichos resultados. En dos años sucesivos se determinó la K_s por distintas técnicas de campo (doble anillo, simulador de lluvia, permeámetro de Guelph y de disco) y de laboratorio, sobre un Argiudol de la Pampa Ondulada bajo siembra directa. Se compararon los resultados de K_s generados por los distintos procedimientos, como también si existió algún grado de vinculación entre los mismos y con otras propiedades físicas edáficas. Se estudió además la variabilidad de los resultados obtenidos. El suelo sobre el que se trabajó presentó un contenido inicial de humedad alto y una condición física pobre. El contenido hídrico inicial solo influyó sobre los resultados de K_s aportados por el doble anillo y el simulador de lluvia, mientras que la densidad aparente lo hizo sobre los generados con el permeámetro de Guelph y por la técnica de laboratorio. Las diferencias encontradas en la K_s determinada por las distintas técnicas, respondieron fundamentalmente al tipo de flujo dominante: vertical (doble anillo y simulador de lluvia), tridimensional (permeámetro de Guelph y de disco) y libre en la parte inferior del suelo (laboratorio), aumentando en ese mismo orden el valor de K_s observado.

Palabras clave: infiltración; propiedades físicas; variabilidad

SATURATED HYDRAULIC CONDUCTIVITY DETERMINED WITH DIFFERENT PROCEDURES IN SOILS WITH HIGH SOIL WATER CONTENT

ABSTRACT

Saturated hydraulic conductivity (K_s) has a strong influence on the partition of the rain in infiltration and runoff. A correct value of this property is important to estimate in a real way the hydrological and erosion processes. The aim of the present work was: To compare the results of K_s obtained in soils under agriculture with high initial water content and located in two different positions of the landscape, determined by different field and laboratory procedures, analyzing in turn the incidence of other soil physical properties over these results. In two successive years, the K_s was determined by different field techniques (double ring, rain simulator, Guelph and disk permeameter) and a laboratory practice, on an Argiudol of Rolling Pampa under no tillage. The results of K_s generated by the different procedures were compared, as well as if there was some link between them and with other soil physical properties. The K_s variability was also studied. The soil presented high initial water content and a poor physical condition. The initial water content only influenced the results of K_s obtained with the double ring and with the rain simulator, while bulk density affected those generated with Guelph permeameter and by the laboratory technique. The differences found in K_s determined by the several techniques were linked to the dominant flow type: vertical (double ring and rain simulator), three-dimensional (Guelph and disk permeameter) and free in the lower part of the soil (laboratory), increasing in the same order the value of K_s observed.

Key words: infiltration, physical properties; variability

¹ Facultad de Agronomía (UBA)

² CONICET

* Autor de contacto castigli@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

La conductividad hidráulica saturada (K_s) es una de las propiedades edáficas más importantes en la interacción suelo-planta-agua, como también lo es respecto al movimiento de agua y transporte de solutos en profundidad (Deb & Shukla, 2012). La K_s es requerida por distintos modelos de crecimiento de cultivos y de movimiento de agua en el suelo (Reynolds *et al.*, 2000), de la misma manera que muchas veces es necesaria para evaluar la calidad física edáfica (Gregorich *et al.*, 1993). Esta propiedad ejerce una fuerte influencia sobre la partición de la lluvia en el flujo de agua vertical y horizontal. Por lo tanto, su correcta estimación es necesaria para poder modelar de manera realista los procesos hidrológicos que ocurren en el suelo (Zimmermann *et al.*, 2013).

La K_s es una de las propiedades edáficas que presenta mayor variabilidad (Deb & Shukla, 2012), estando la misma condicionada entre otras causas por el instrumental empleado para su determinación y por los protocolos de medición aplicados (Stockton & Warrick, 1971). Los resultados de este parámetro son muy dependientes del volumen de suelo utilizado, de la forma de obtención de la muestra, de la geometría y tortuosidad de los poros y de distintas características físicas hidrológicas del suelo (Reynolds *et al.*, 2000). En este sentido, Reynolds *et al.* (2000) al analizar los resultados de K_s obtenidos mediante tres procedimientos en tres suelos distintos y bajo tres usos de la tierra diferentes, observaron que la condición textural y estructural de los suelos era un factor determinante en la selección de la tecnología usada para medir K_s .

No todas las formas de estimación de K_s son apropiadas para los distintos usos de este parámetro, como tampoco para todos los suelos ni para el conjunto de estados en que estos se pueden encontrar (Reynolds *et al.*, 2000). Deb & Shukla (2012) mencionan que determinaciones de K_s realizadas usando un anillo simple, pueden producir diferencias significativas en los resultados medios y en su error estándar, respecto a aquellas hechas con otro instrumental. Así mismo, el tamaño del soporte usado puede afectar los resultados de variabilidad determinados. En

este sentido, Mallants *et al.* (1997) comprobaron que la heterogeneidad y el valor medio de K_s , disminuían con el aumento del tamaño de la muestra considerada.

Por su parte, mediciones de K_s realizadas a campo pueden producir resultados diferentes y con distinta heterogeneidad respecto a los obtenidos en el laboratorio (Shukla, 2011). Sasal *et al.* (2010) encontraron una asociación positiva y significativa entre la K_s medida a campo y en el laboratorio, pese a lo cual los resultados de este último procedimiento fueron más variables y superiores a los registrados a campo. De la misma manera, Arya *et al.* (1998) también encontraron una relación positiva entre la K_s obtenida a campo y en el laboratorio. Sin embargo, en dicha experiencia y contrariamente a lo experimentado por Sasal *et al.* (2010), los resultados del laboratorio fueron menores a los observados a campo, probablemente como consecuencia de la compactación sufrida por el suelo durante el muestreo realizado bajo una condición de humedad elevada.

Los diferentes métodos de campo y de laboratorio desarrollados para estimar esta propiedad, presentan ventajas y desventajas (Reynolds & Elrick, 2005). En las determinaciones realizadas con doble anillo, se requieren grandes volúmenes de agua y largos períodos de tiempo hasta lograr estimar un valor de K_s de equilibrio. No obstante, la variabilidad en los resultados es menor ya que se abarca un mayor volumen de suelo. Mediante el uso del permeámetro de Guelph (Reynolds *et al.*, 2002), el flujo de agua es en las tres dimensiones, pero se pueden producir compactaciones en las paredes del orificio que se abre en el suelo para introducir el instrumental. También se menciona que esta técnica no es recomendable en aquellos suelos donde el movimiento vertical del agua está fuertemente afectado por la presencia de poros aislados, desarrollados por el crecimiento de las raíces o por el movimiento de las lombrices. Por su parte, los simuladores de lluvia tratan de reproducir la disrupción producida por la gota de lluvia sobre el suelo, mientras que de la misma manera que con el doble anillo, este instrumental consume gran cantidad de agua y tiempo operativo. Los permeámetros de disco (Angulo Jaramillo *et al.*, 2000) generan muy poco disturbio sobre

el suelo, necesitan menor volumen de agua y son fáciles de transportar. Sin embargo, presentan algunas limitaciones ya que para su buen funcionamiento necesitan estar apoyados sobre una superficie plana y sin perturbaciones, debiendo existir un buen contacto entre la placa porosa del instrumental y el suelo. La determinación de K_s en laboratorio (Klute & Dirksen, 1986), presenta la limitación de que es estimada sobre una muestra de suelo de pequeñas dimensiones, la cual es afectada durante su recolección a campo, lo mismo que puede haber flujo de agua entre las paredes del cilindro y el suelo. Pese a ello, esta técnica presenta la ventaja de poder ser realizada en laboratorio de manera sencilla, pudiendo analizar el comportamiento de la K_s para distintos estratos del suelo, sin consumir mucho tiempo a campo.

Tal como mencionan Reynolds *et al.* (2000), comparar técnicas de medición de K_s es una tarea importante, ya que puede ser una de las pocas fuentes de información a partir de la cual se puede seleccionar el método de obtención de esta propiedad más apropiado para cada circunstancia.

En la Región Pampeana y en particular en la Pampa Ondulada, han sido reportados diversos síntomas de degradación de las tierras (Casas & Albarracín, 2015). Uno de los más importantes es la erosión hídrica, asociado a la ocurrencia de procesos de degradación física (Irurtia *et al.*, 1988). En esta subregión, el alto porcentaje de limos y fitolitos presentes en los suelos (Cosentino & Pecorari, 2002), juntamente con la implementación de secuencias de cultivo poco eficientes en el mantenimiento de la calidad física-biológica edáfica, la presencia de baja cobertura en la superficie del suelo y la inadecuada reposición de nutrientes (Austin *et al.*, 2006; Kraemer *et al.*, 2017), han desencadenado procesos de deterioro del suelo que repercutieron en una disminución en su tasa de infiltración (Chagas *et al.*, 2011; Kraemer, 2015). A su vez, este proceso se ve agravado en los años con mayor volumen de precipitaciones y con una condición de suelo húmedo durante gran parte del año, ocasionando como consecuencia un incremento en los coeficientes de escurrimiento y en la tasa de erosión. En este

contexto, la evaluación de distintos procedimientos para estimar la K_s en suelos con alto grado de humedad inicial cobra trascendencia, presuponiendo que los resultados de este parámetro aportados por las distintas técnicas son diferentes, existiendo a su vez la dificultad de relacionar los mismos, debido a que las condiciones en que se desarrollan los ensayos de infiltración difieren entre sí.

Los objetivos del presente trabajo fueron: Comparar los resultados de K_s obtenidos en suelos bajo agricultura con alta humedad inicial y ubicados en dos posiciones del paisaje (loma y media loma), determinados mediante distintos procedimientos de campo y de laboratorio, analizando a su vez la incidencia que tienen otras propiedades físicas edáficas sobre dichos resultados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de muestreo y diseño experimental

El trabajo se realizó sobre un Argiudol vértico, ubicado en la cuenca media del Arroyo del Tala (San Pedro, Pcia. de Bs. As.). Dicho suelo presenta en el horizonte superficial (0-10 cm) una textura franco arcillo limosa (arcilla: 37,5%; limo: 52,4%; arena: 10,1%) y un contenido de carbono medio del 1,5% (Kraemer *et al.*, 2013). Las determinaciones y toma de muestras fueron realizadas en el mes de mayo en dos años sucesivos luego de la cosecha del cultivo de verano (2016: soja; 2017: maíz). Estas se hicieron en dos posiciones del paisaje diferentes: loma (33° 48' 2,35" S y 59° 55' 17,4" O) y media loma (33° 48' 9,84" S y 59° 54' 58,37" O), sobre un lote con dieciocho años bajo siembra directa continua, siendo la sucesión de cultivos trigo/soja-maíz-soja. En cada posición del paisaje y para ambas fechas se eligió un sector de 2 ha, representativo de las condiciones edáficas de cada ambiente, dentro del cual se realizaron los muestreos y los ensayos de infiltración, obteniéndose cinco repeticiones de cada una de las variables analizadas por año y posición. La humedad edáfica superficial (0-5 cm) para el primer y segundo año fue de 0,41 cm³ cm⁻³ y 0,31 cm³ cm⁻³, respectivamente (**Tabla 1**).

Tabla 1. Valores medios correspondientes a ambas posiciones del paisaje, de las diferentes propiedades físicas evaluadas a dos profundidades y en dos años.

Table 1. Mean values of both landscape positions of different physical properties evaluated at two depths and in two years.

Profundidad (cm)	Hum (cm ³ cm ⁻³)	Dap (g cm ⁻³)	Mac1 (cm ³ cm ⁻³)	Mac2 (cm ³ cm ⁻³)	Cai (cm ³ cm ⁻³)	Agu (cm ³ cm ⁻³)	Pe (cm ³ cm ⁻³)	S
Año 2016								
0-5	0,41 b	1,22 b	0,04 a	0,07 a	0,11 a	0,09 a	0,08 a	0,03 a
5-10	0,36 a	1,35 b	0,02 a	0,05 a	0,07 a	0,10 a	0,06 a	0,02 a
Año 2017								
0-5	0,31 a	1,11 a	0,03 a	0,10 b	0,13 a	0,09 a	0,12 b	0,04 b
5-10	0,32 a	1,20 a	0,02 a	0,07 a	0,08 a	0,08 a	0,12 b	0,02 a

Hum: humedad gravimétrica; Dap: densidad aparente; Mac1: volumen de macroporos (>312 μm); Mac2: volumen de macroporos (312 a 31 μm); Cai: capacidad de aire; Agu: contenido de agua útil; Pe: porosidad estructural; S: índice de calidad física. Letras minúsculas distintas para una misma propiedad y profundidad: diferencias significativas entre años (p<0,05)

Hum: gravimetric soil water content; Dap: bulk density; Mac1: volume of macropores (>312 μm); Mac2: volume of macropores (312 to 31 μm); Cai: air capacity; Agu: useful water content; Pe: structural porosity; S: physical quality index. Different lowercase letters for the same property and depth: significant differences between years (p <0,05)

Determinación de la conductividad hidráulica saturada (Ks)

A campo

Permeámetro de Guelph (Guelph) (Reynolds & Elrik, 2005)

Este procedimiento implicó realizar un orificio cilíndrico en el suelo de 6 cm de diámetro y 15 cm de profundidad. La carga hidráulica utilizada fue de 10 cm. Al fluir el agua a través del suelo, la columna de agua en los reservorios del permeámetro descendió, manteniendo estable la carga hidráulica en el pozo. Esta velocidad de descenso fue registrada en intervalos constantes de tiempo, por medio de una escala graduada presente en el equipo. En ambos años, el promedio de tiempo para el logro de la estabilización de las lecturas fue de 35 minutos. A partir de ese momento se hicieron cada dos minutos, cuatro lecturas de descenso de la columna de agua, obteniéndose posteriormente un promedio de dichas mediciones para el cálculo de la Ks. Elrick *et al.* (1989) propusieron la siguiente ecuación (1), para evitar valores negativos en esta propiedad: :

$$Ks = \frac{[C*Q*S]}{[(2*\pi*H^2)+(C*\pi*a^2)+\left(\frac{2*\pi*H}{\alpha^*}\right)]} \quad (1)$$

Siendo:

C= factor de forma adimensional obtenido de H/a
 Q= área de la sección transversal del reservorio del permeámetro (cm²)

S= estado estable de la caída del nivel de agua en el reservorio del permeámetro (cm s⁻¹)
 H= profundidad de agua en el pozo (cm)
 a= radio del pozo (cm)
 α*= parámetro de textura/estructura (cm⁻¹)

La determinación a campo del parámetro α, presupone variar la carga hidráulica y contar con resultados positivos de Ks. En el presente trabajo, la mayoría de los valores de Ks calculados de esta manera fueron negativos, impidiendo una correcta determinación de dicho parámetro. Este mismo inconveniente fue reportado por numerosos investigadores (Salverda & Dane, 1993; Lilly, 1994). Por lo tanto, el valor de α fue obtenido a partir del uso de tablas (Elrick *et al.*, 1989), resultando ser 0,12 cm⁻¹. Dicho valor corresponde a suelos con textura franca a arcillosa, que presentan estructura y que se encuentran bajo uso agrícola, siendo las restantes categorías de suelo y estructura presentes en la tabla (Elrick *et al.*, 1989), no representativas del suelo analizado.

Doble anillo (Da) (Reynolds & Elrik, 2005)

Consistió en la utilización de dos cilindros de metal dispuestos en forma concéntrica, con el propósito de reducir el flujo lateral de agua en el suelo desde donde se inserta el cilindro interno. Ambos anillos, con diámetros internos de 30 y 60 cm para el cilindro interno y externo, respectivamente, se enterraron hasta una profundidad de

10 cm. Se realizaron mediciones de tasa de infiltración en el anillo interno en intervalos de tiempo crecientes, desde 1 minuto hasta 30 minutos, durante un tiempo total de 2 horas. Se mantuvo en ambos anillos, una carga constante de agua de 15 cm sobre la superficie del suelo. Se asumió que la tasa de infiltración en el equilibrio era igual a la K_s .

Permeámetro de disco (Pdisco) (Reynolds & Elrik, 2005)

Consiste en un disco de 12,5 cm de diámetro que entra en contacto con el suelo por medio de una membrana de nylon poroso. Este disco se alimenta de agua mediante un depósito transparente con una escala graduada. Para este trabajo la tensión aplicada a la membrana fue de 0 cm y la estimación de la K_s se resolvió por el método del flujo transitorio (Vandervaere *et al.*, 2000) (Ecuación 2). Se eligió este último procedimiento mencionado, dado el menor tiempo de medición requerido respecto al del flujo estacionario y a que consiste en una forma simple y efectiva para obtener resultados de K_s válidos (Reynolds & Elrik, 2005). En cada ensayo se determinó la tasa de descenso de agua en la escala graduada en intervalos de 2 minutos, durante un período de tiempo de aproximadamente 40 minutos. En gabinete se graficó la relación $\Delta l/\Delta t^{1/2}$ vs $t^{1/2}$ (siendo l : lámina de agua infiltrada; t : tiempo), obteniéndose una regresión lineal para dicha relación. De esta manera, la pendiente de la regresión generada es: $2 * E_2$ y su ordenada al origen: E_1 .

$$K_s = \left(\frac{3}{(2-\beta)} \right) \left[E_2 - \frac{\omega * E_1^2}{a(\theta_0 - \theta_i)} \right] \quad (2)$$

Siendo:

$\beta = 0,6$

$E_1 =$ Ordenada al origen de la regresión $\Delta l/\Delta t^{1/2}$ vs $t^{1/2}$

$E_2 = 1/2 * ($ pendiente de la regresión $\Delta l/\Delta t^{1/2}$ vs $t^{1/2})$

$\omega = 0,75$ (Smettem *et al.*, 1994)

$a =$ radio del disco del permeámetro

$\theta_0 =$ humedad de saturación del suelo

$\theta_i =$ humedad inicial del suelo

Simulador de lluvia (Sim) (Irurtia & Mon, 1994)

Sobre una parcela de 25 cm de lado se aplicó lluvia simulada con una intensidad de 60 mm h^{-1} sobre suelo descubierto. Se registró la lámina de lluvia caída y de escurrimiento cada 5 minutos, determinando por diferencia la lámina de agua infiltrada en el mismo intervalo de tiempo. La duración de cada ensayo dependió del tiempo necesario hasta estabilizar la tasa de infiltración, siendo en promedio el tiempo requerido de 40 minutos. Una vez ocurrido esto, se promediaron los valores de las tres últimas lecturas, asumiendo que dicho resultado era equivalente a la K_s .

En laboratorio

Método de la carga variable (Lab) (Klute & Dirksen, 1986)

Para cada fecha y posición en el paisaje y dentro de cada sector seleccionado, se obtuvieron muestras con cilindros metálicos a la profundidad de 0-5 cm. Estos presentan un volumen de 156 cm^3 (6,3 cm de diámetro y 5,0 cm de altura), y luego de obtener la muestra de suelo fueron llevados al laboratorio, saturados con agua destilada para posteriormente realizar la determinación de K_s por el método de la carga variable (Klute & Dirksen, 1986).

Caracterización física edáfica de los sitios evaluados

Para evaluar las características y propiedades físicas del suelo al momento de los ensayos de determinación de K_s , se tomaron muestras ($n=5$) en cada posición del paisaje, en cada fecha y a dos profundidades (0-5 cm y 5-10 cm).

Posteriormente fueron realizadas las siguientes determinaciones:

Densidad aparente (D_{ap}) (Blake & Hartge, 1986): a partir del método del cilindro, con cilindros metálicos de 250 cm^3 de volumen.

Humedad volumétrica (Hum) (Gardner, 1986): luego de pesar la muestra de suelo con la humedad de campo y ser sometida durante 48 h a 105 C° , esta fue pesada nuevamente determinando los gramos de agua perdida por gramo de suelo. La humedad gravimétrica así determinada, fue

transformada a humedad volumétrica, luego de ser multiplicada por la Dap del suelo.

Distribución por tamaño de poros (Klute, 1986): fue estimada a partir de la obtención de las curvas de retención hídrica. Muestras no disturbadas, obtenidas con cilindros con 83,1 cm³ de volumen (4,6 cm de diámetro y 5,0 cm de altura), fueron sometidas a diferentes presiones (cm) mediante olla de presión: 0, 10, 30, 100, 330, 2000 y 15000. Asumiendo que el espacio ocupado por los poros se asemeja al de tubos capilares, el diámetro efectivo correspondiente a una determinada presión aplicada fue calculado de acuerdo a la ecuación de Young-Laplace (Tuller *et al.*, 1999). Con esta información se obtuvo el volumen correspondiente a distintas categorías de poros. De acuerdo con el criterio planteado por Reynolds *et al.* (2009), se consideraron macroporos (Mac1) a aquellos con un diámetro interno igual o superior a los 312 μm (10 cm de presión), la capacidad de aire (Cai) del suelo se estimó como la diferencia en el contenido de agua entre suelo saturado y el sometido a 100 cm de presión (poros con diámetro interno de 31 μm), y el contenido de agua útil (Agu) como la diferencia en el contenido de agua del suelo entre los 100 cm de presión (poros con diámetro interno de 31 μm) y los 15000 cm de tensión (poros con diámetro interno de 0,2 μm). También se consideró el volumen ocupado por los macroporos de menor tamaño (Mac2) (con diámetro interno entre 312 y 31 μm).

Índice de calidad física (S) (Dexter, 2004): Este índice corresponde a la pendiente de la curva de retención hídrica en su punto de inflexión. Para ello y mediante el programa RETC (van Genuchten *et al.*, 1991), se estimaron para cada muestra de suelo los parámetros del modelo de retención hídrica de van Genuchten (1980), para posteriormente mediante fórmula (Dexter, 2004) calcular S. Un mayor valor de este índice corresponde a una mejor calidad física del suelo.

Porosidad estructural (Pe) y textural del suelo (Ptx) (Stengel, 1988): La Pe se calculó a partir de la porosidad total, la cual fue a su vez determinada con la información de densidad aparente, restándole luego a dicho valor el correspondiente a la porosidad textural. Para la obtención de

este último parámetro, se siguió el protocolo de Stengel (1979), buscando con esta metodología eliminar la porosidad estructural y llevar la organización textural a condiciones tan estandarizadas como fuera posible. Se mezcló suelo previamente tamizado con tamiz de 2 mm de abertura de malla, con una cantidad de agua igual a 1,9 veces su humedad equivalente. La pasta de esta manera formada, se dejó reposar durante 24 h, la que luego de un segundo mezclado, se filtró mediante el uso de una bomba de vacío. Una vez secadas al aire, las muestras fueron quebradas y tamizadas con tamiz de 3 y 2 mm de abertura de malla, siendo utilizada la fracción de suelo que quedó entre ambos tamices. Posteriormente se determinó la porosidad de esa fracción de agregados, utilizando la ecuación 3 (Stengel, 1979):

$$Pt = \left[1 - \left(\frac{pc}{pp} \right) \right] * 100 \quad (3)$$

siendo:

Pt: porosidad textural (%)

pc: densidad aparente de los agregados de 2 a 3 mm (g cm⁻³)

pp: densidad de partícula (g cm⁻³)

El volumen de la fracción de suelo analizada (agregados de 2 a 3 mm), se determinó mediante el principio de Arquímedes, utilizando kerosene como fluido.

Análisis estadístico

Los resultados de las propiedades físicas evaluadas, con la excepción de S y Ks, presentaron distribución normal en ambas profundidades. Por tal motivo, el análisis de varianza de S se realizó por un método no paramétrico (Kruskal & Wallis, 1952) y para el caso de Ks, los resultados fueron transformados a logaritmo natural (LnKs). El efecto de ambos factores (año y posición en el paisaje) sobre el valor del LnKs y de las restantes propiedades físicas, así como la comparación de resultados del LnKs entre las distintas técnicas evaluadas, se realizó mediante ANOVA (Di Rienzo *et al.*, 2001). A partir del análisis de correlación, se estudió el grado de asociación entre los resultados del LnKs obtenidos por los distintos procedimientos analizados, como así también entre el LnKs con el Ln de

las restantes propiedades físicas edáficas. Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condición física superficial del suelo

Con la excepción de S y Pe (5-10 cm), los restantes parámetros que se determinaron para caracterizar la condición física edáfica de cada año, no fueron significativamente diferentes entre la loma y media loma. En ambos años, S (5-10 cm) fue superior en la loma, mostrando el suelo de dicha posición una mejor condición física edáfica, mientras que Pe (5-10 cm) también registró mayores valores en el suelo de la loma pero solo en 2017. Como consecuencia de este bajo efecto de la posición en el paisaje sobre estas variables, en la **Tabla 1** se presentan los valores promedio de ambos sitios para cada una de ellas, determinados en ambos años.

La humedad edáfica superficial en 2016 fue mayor respecto a 2017 ($p < 0,05$), mientras que de 5 a 10 cm no se observaron diferencias entre años. Este contenido hídrico representó en 2016 y 2017, el 98 % y 67 % respectivamente, de la porosidad del suelo saturado determinada en laboratorio, mientras que de 5 a 10 cm el grado de saturación para esos mismos años fue del 94% y 89%, respectivamente. La densidad aparente mostró un menor valor en el segundo año de muestreo ($p < 0,05$) para ambas profundidades. La porosidad estructural también presentó diferencias entre años, siendo su mayor valor para los dos estratos analizados, el relevado en 2017 ($p < 0,05$). El volumen de macroporos con diámetro interno entre 312 y 31 μm , también fue mayor al segundo año ($p < 0,05$), pero solo para el estrato superficial. Por su parte, el parámetro S (0-5 cm) presentó un valor superior y por lo tanto una mejor calidad física edáfica ($p < 0,05$) en 2017, mientras que a mayor profundidad (5-10 cm) no se observaron diferencias entre años. El resto de las propiedades que se utilizaron para caracterizar la condición física edáfica, no presentaron diferencias significativas entre años.

Reynolds *et al.* (2009) mencionaron valores de densidad aparente entre 0,90 y 1,20 gr cm^{-3}

como óptimos, mientras que de 1,25 a 1,30 gr cm^{-3} podrían ocurrir pérdidas de rendimiento en los cultivos debido a la falta de aireación. No obstante, algunos autores mencionaron que muchas veces esta propiedad no resulta un buen indicador para caracterizar la calidad física de los suelos (Logsdon & Karlen, 2004; Asgarzadeh *et al.*, 2010). Reynolds *et al.* (2009) también señalaron que resultados de Mac1 iguales o menores a 0,04 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$, son característicos de suelos compactados, mientras que con valores de Cai iguales o mayores a 0,10-0,14 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ habría una buena aireación de las raíces. Respecto al agua útil, estos investigadores consideraron que resultados menores a 0,10 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ son bajos, mientras que aquellos de S ubicados entre 0,020 y 0,035 representan una condición física del suelo pobre. De acuerdo a lo mencionado y a los resultados de la **Tabla 1**, la mayoría de los parámetros evidenciaron en ambos años una condición física del suelo pobre. No obstante, en 2017 la Dap y Pe de ambos estratos y el valor de S superficial mostraron una mejor situación. A su vez y como ocurre normalmente bajo siembra directa, el estrato subsuperficial del suelo mostró peores resultados en las propiedades físicas respecto al superficial. Esta mejora observada al segundo año de muestreo en algunos de los parámetros analizados, se debería al efecto del cultivo de maíz. En este sentido, se han señalado consecuencias favorables de dicho cultivo en el corto plazo sobre la macroporosidad edáfica (Castiglioni *et al.*, 2010; Restovich *et al.*, 2010).

Conductividad hidráulica saturada

A partir del análisis de varianza, se comprobó que no hubo un efecto significativo de la posición en el paisaje en los resultados de esta propiedad, mientras que el factor año influyó en los valores de Ks. No obstante, hubo diferencias entre años y entre formas de determinación de Ks, respecto al grado en que influyó el primer factor mencionado. En 2016, los resultados de Ks generados por Guelph y Lab en la media loma, fueron un 48 % y 56 % superiores respectivamente, a los observados en la loma. Por su parte, en 2017 y en la media loma, Sim generó valores de Ks un 154 % superiores a los de la loma, mientras que

Pdisco produjo en este último sitio resultados un 36 % superiores de esta propiedad respecto a la media loma. En todos estos casos, la variabilidad de Ks de cada sitio fue alta (coeficientes de variación entre el 40 % y 152 %), lo que no permitió separar estadísticamente los resultados entre posiciones del paisaje. En los restantes ensayos de infiltración no se presentaron diferencias mayores al 7 %, en la Ks registrada entre ambos sitios.

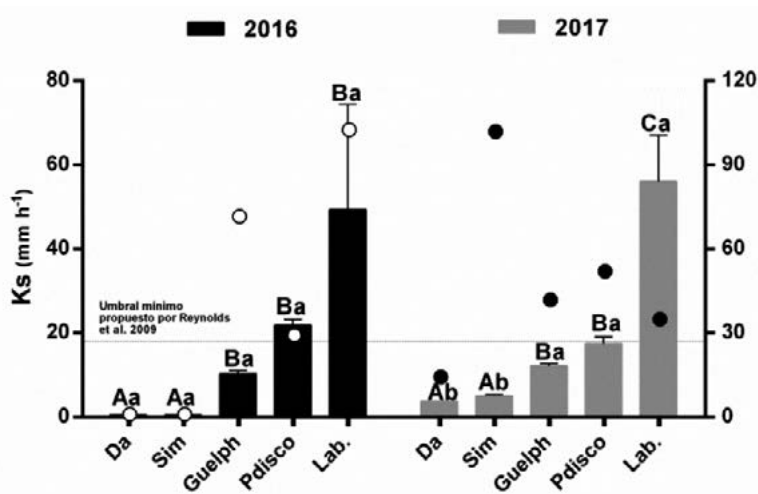
Al no expresarse estadísticamente el efecto de la diferente posición en el paisaje sobre la Ks, se compararon los resultados de esta propiedad entre los distintos procedimientos en cada año por separado, agrupando los obtenidos en la loma y media loma. En la **Figura 1** se detallan los valores medios de la Ks sin transformar, considerando ambas posiciones del paisaje en forma conjunta, su desvío estándar y el coeficiente de variación, determinados en cada año y con cada instrumental.

Los resultados promedio de esta propiedad generados por cada técnica, se ubicaron de igual manera en ambos años, siendo el orden el siguiente: Lab>Pdisco>Guelph>Sim>Da. Sin embargo, a partir del análisis estadístico se observaron algunas diferencias entre años, lo mismo que el coeficiente de variación experimentó algunas modificaciones (**Figura 1**).

Todos los valores de Ks calculados a partir de las metodologías desarrolladas a campo, presen-

taron valores muy bajos, ubicándose mayoritariamente por debajo del umbral mínimo propuesto por Reynolds *et al.* (2009) (18 mm h⁻¹). Por el contrario, la Ks determinada en laboratorio estuvo por encima de dicho valor. Esta propiedad determinada a campo, normalmente presenta valores menores a la obtenida en laboratorio, como consecuencia de que el proceso de infiltración se da sobre suelos no saturados y por lo tanto ante la presencia de aire atrapado en el interior del suelo, disminuyendo como consecuencia la velocidad de avance del agua en profundidad (Reynolds & Elrick, 2005). En el presente estudio, al encontrarse el suelo con un alto contenido de humedad, es probable que las diferencias entre ambos tipos de técnicas (laboratorio y campo) respondieron a otras causas, las que se discutirán más adelante.

En 2016, Da y Sim generaron resultados de Ks igual a 0 mm h⁻¹, los que fueron significativamente inferiores (p<0,05) a los obtenidos por las otras formas de medición de este parámetro, no existiendo diferencias significativas en esta propiedad entre los restantes procedimientos analizados. En 2017, Da y Sim también obtuvieron un valor de Ks significativamente menor (p<0,05) al resto, Guelph y Pdisco aportaron valores intermedios e inferiores a Lab (p<0,05), mientras que este último procedimiento fue el que generó los resultados mayores (p<0,05) (**Figura 1**). A pesar de esta falta de diferencias significativas entre



Da: doble anillo; Sim: simulador de lluvia; Guelph: permeámetro de Guelph; Pdisco: permeámetro de disco; Lab: método de laboratorio. Letras mayúsculas distintas para cada año: diferencias estadísticas significativas del LnKs entre técnicas (p<0,05). Letras minúsculas distintas para cada técnica: diferencias estadísticas significativas del LnKs entre años (p<0,05)
Da: double ring; Sim: rain simulator; Guelph: Guelph permeameter; Disc: disk permeameter; Lab: laboratory method. Different capital letters for each year: significant statistical differences of LnKs between techniques (p <0,05). Different lowercase letters for each technique: significant statistical differences of LnKs between years (p <0,05).

Figura 1. Valores medios de Ks correspondientes a ambas posiciones del paisaje, su desvío estándar (barras) y coeficiente de variación (círculos), determinados con cada instrumental en cada uno de los años evaluados.

Figure 1. Mean Ks values of both landscape positions, their standard deviation (bars) and coefficient of variation (circles), determined with each instrument in each of the years evaluated.

los valores de K_s obtenidos con Pdisco y Guelph, los generados con el primer procedimiento mencionado fueron un 170% (año 2016) y un 57 % (año 2017) mayores a los determinados con Guelph, superando (año 2016) o igualando (año 2017) Pdisco el valor de K_s umbral propuesto por Reynolds *et al.* (2009). Estas diferencias entre ambas metodologías se debería a que el proceso de infiltración con Guelph se desarrolla en forma subsuperficial, y como se viera anteriormente la condición física del suelo a dicha profundidad fue menos favorable que en superficie (**Tabla 1**).

Variabilidad de las determinaciones

Los coeficientes de variación de esta propiedad se ubicaron dentro de los rangos mencionados por otros autores (Paz González *et al.*, 2001) (**Figura 1**). En este sentido, Jury (1986) menciona que aquellos parámetros relacionados con el flujo de agua (conductividad hidráulica saturada e infiltración) presentan alta variabilidad, pudiendo esta superar el 100%.

Con la excepción de Lab y Guelph, el CV de K_s obtenido por cada técnica, siempre fue mayor en el segundo año, al estar el suelo más seco. Castiglioni *et al.* (2018) determinaron que la variabilidad en la tasa de infiltración de equilibrio, medida mediante simulador de lluvia, disminuía considerablemente cuando el suelo se encontraba con muy bajo contenido hídrico. Paz González *et al.* (2001) también mencionaron que el contenido de agua del suelo puede afectar la variabilidad de esta propiedad. De acuerdo a los resultados del presente trabajo y a los aportados por Castiglioni *et al.* (2018), es probable que la heterogeneidad de K_s medida a campo sea menor con contenidos de humedad edáfica inicial altos y bajos, aumentando esta en presencia de valores medios. A su vez, el CV de la K_s en 2016 se ordenó de acuerdo a la superficie abarcada por cada equipo, disminuyendo este parámetro al aumentar el área de influencia del instrumental utilizado. El diámetro del orificio realizado para el uso del permeámetro de Guelph y el de los cilindros para la determinación de Lab son similares, pese a lo cual en el primer equipo mencionado la determinación de K_s no es confinada, por lo que se presupone que el flujo de agua abarca un área

de suelo superior. Gupta *et al.* (1993) también determinaron un menor coeficiente de variación en la K_s medida con Sim y Da, respecto a la observada utilizando Guelph y Pdisco. Por su parte, Mallants *et al.* (1997) al cuantificar la K_s sobre columnas de suelo no disturbadas que presentaban un volumen creciente, comprobaron una disminución en la variabilidad de esta propiedad con el incremento del área de la muestra afectada. Estos autores mencionaron que los resultados de K_s están condicionados por la presencia o ausencia de macroporos continuos, siendo su hallazgo más aleatorio en la medida que el tamaño de la muestra disminuye, obteniéndose de esta manera resultados más variables con muestras más pequeñas. Sin embargo, en el presente trabajo y estando el suelo más seco en el año 2017 (**Tabla 1**), los coeficientes de variación de K_s aportados por Guelph, Lab y Sim, no se ordenaron de acuerdo al área afectada por dicho instrumental. Según estos resultados, la relación negativa entre el aumento de la superficie abarcada por cada equipo y la variabilidad de K_s , se vería reflejada sobre todo en suelos con alto contenido hídrico.

Relación entre la condición física edáfica y los resultados de K_s y entre los distintos procedimientos utilizados para determinar esta propiedad.

Se determinó un efecto de Hum (0-5 cm) sobre la K_s generada mediante Sim y Da, y de Dap (0-5 cm y 5-10 cm) sobre la determinada con Guelph y Lab (**Tabla 2**). Por su parte, solo se observó una tendencia positiva entre los resultados de Pe (5-10 cm) y Guelph, Mac2 (0-5 cm) y Sim y entre Mac1 (0-5 cm) y Pdisco (**Tabla 2**).

En 2016, Sim y Da obtuvieron valores de K_s significativamente inferiores a los registrados al año siguiente ($p < 0,05$) (**Figura 1**), siendo el contenido hídrico del suelo superficial (0-5 cm) significativamente superior en dicho año (**Tabla 1**). Castiglioni *et al.* (2018) también observaron cambios en la tasa de infiltración de equilibrio medida con simulador de lluvia, como resultado de diferencias registradas en la humedad inicial del suelo. Dichos autores corroboraron para un Argiudol ácuico de Entre Ríos bajo siembra directa, que el aumento en la tasa de infiltración de

Tabla 2. Coeficientes de correlación entre los valores del LnKs, estimados mediante las distintas técnicas, y con el Ln de algunas propiedades físicas edáficas.

Table 2. Correlation coefficients between the LnKs values, estimated by the different techniques, and with the Ln of some soil physical properties.

	Guelph	Sim	Da	Lab	Pdisco
Guelph		0,78ns	0,96**	0,87ns	-0,68ns
Sim			0,92*	0,56ns	-0,89ns
Da				0,75ns	-0,84ns
Lab					-0,53ns
Hum(0-5 cm)	-0,86ns	-0,94*	-0,96**	-0,55ns	0,86ns
Hum (5-10 cm)	0,08ns	-0,50ns	-0,21ns	0,43ns	0,52ns
Dap (0-5cm)	-0,96**	-0,72ns	-0,88ns	-0,97**	0,66ns
Dap (5-10 cm)	-0,94*	-0,66ns	-0,84ns	-0,99**	0,60ns
Pe (0-5 cm)	0,85ns	0,41ns	0,74ns	0,67ns	-0,25ns
Pe (5-10 cm)	0,93*	0,52ns	0,82ns	0,79ns	-0,39ns
Mac1 (0-5 cm)	-0,47ns	-0,92ns	-0,70ns	-0,22ns	0,94*
Mac1 (5-10 cm)	-0,64ns	-0,37ns	-0,62ns	-0,26ns	0,19ns
Mac2 (0-5 cm)	0,52ns	0,91*	0,69ns	0,45ns	-0,97**
Mac2 (5-10 cm)	0,32ns	0,78ns	0,50ns	0,33ns	-0,88ns

Guelph: Permeámetro de Guelph; Sim: simulador de lluvia; Da: doble anillo; Pdisco: permeámetro de disco; Lab: determinación de Ks en laboratorio; Hum: humedad gravimétrica; Dap: densidad aparente; Mac1: volumen de macroporos (>312 μm); Mac2: volumen de macroporos (312 a 31 μm); Pe: porosidad estructural. * $p < 0,10$; ** $p < 0,05$; ns: no significativo.

Guelph: Guelph permeameter; Sim: rain simulator; Da: double ring; Disc: disk permeameter; Lab: laboratory determination of Ks; Hum: gravimetric soil water content; Dap: bulk density; Mac1: volume of macropores (>312 μm); Mac2: volume of macropores (312 to 31 μm); Pe: structural porosity. * $p < 0,10$; ** $p < 0,05$; ns: not significant.

equilibrio estaba asociado al incremento en el volumen de poros con diámetro interno mayor a 50 μm , lo que a su vez era favorecido al contraerse el suelo por desecación. En el presente estudio, solo se observó una tendencia en los efectos positivos de algunos de los parámetros que cuantifican la macroporosidad del suelo sobre la Ks generada mediante Guelph, Sim y Pdisco. Por su parte, con Da y Lab no se encontró ninguna correlación significativa entre ambos grupos de propiedades (**Tabla 2**). Sin embargo y como consecuencia de encontrarse el suelo más seco, en 2017 la Dap (0-5 y 5-10 cm) disminuyó significativamente, al mismo tiempo que aumentó Pe (0-5 y 5-10 cm) y la Mac2 superficial (**Tabla 1**), lo que habría repercutido en forma favorable y significativa solo sobre la Ks determinada en dicho año con Sim y Da. De la misma manera, otros autores (Lin *et al.*, 1998; Zhou *et al.*, 2008) han mencionado la existencia de una relación negativa entre el contenido hídrico edáfico y el volumen de macroporos y el efecto positivo de estos sobre la tasa de infiltración.

Se comprobó que solo los resultados de Ks generados por Da y Guelph se asociaron significativamente ($p < 0,05$), al mismo tiempo que se observó una tendencia similar ($p < 0,10$) entre los aportados por Da y Sim (**Tabla 2**).

Sasal *et al.* (2010), al analizar distintas sucesiones de cultivos bajo siembra directa sobre un Argiudol ácuico de Entre Ríos, determinaron una asociación positiva entre la Ks generada con Lab y Pdisco. No obstante, estos autores comprobaron que los valores de esta propiedad resultantes de la aplicación de la primer técnica mencionada, fueron 2,5 veces mayores a los aportados por la segunda. Según dichos autores, estas diferencias se deberían al efecto de la carga hidráulica impuesta sobre el suelo en las determinaciones de laboratorio y a la disrupción mecánica que se produciría al ser insertados los cilindros en el suelo, que podría romper la continuidad de la estructura laminar desarrollada frecuentemente bajo siembra directa, favoreciendo de esta manera el movimiento vertical del agua (Sasal *et al.*, 2010).

Reynolds *et al.* (2000), trabajando con suelos limosos y franco arcillosos bajo siembra directa, no observaron diferencias significativas en la K_s determinada en laboratorio con cilindro, respecto a la observada a campo con Pdisco. Estos autores sin embargo, al analizar una serie mayor de resultados, originados a partir de aplicar estas dos técnicas en suelos con distinta textura y bajo diferentes usos de la tierra, encontraron una baja proporción de casos en los que había una correlación significativa y positiva entre los valores de K_s obtenidos por ambos procedimientos. Este escaso grado de asociación se debería a la distinta superficie abarcada por ambos equipos y por lo tanto a la diferente cantidad de macroporos que influyeron en la conducción del agua, como también a las diferencias en la dirección del flujo de agua según la técnica utilizada (Reynolds *et al.*, 2000). En este sentido, el movimiento de agua generado con Pdisco es tridimensional, mientras que con el cilindro es solamente vertical.

Los resultados del presente trabajo se asemejaron a los aportados por Reynolds *et al.* (2000), en cuanto a que no se encontraron correlaciones significativas entre la K_s estimada por Lab y Pdisco. Sin embargo, dado que esta propiedad al ser determinada con Lab fue sensible al grado de densificación del suelo mientras que la aportada por Pdisco no (**Tabla 2**), ante el registro de una D_{ap} mayor en el año 2016 (**Tabla 1**), los valores de K_s de Lab y Pdisco no fueron significativamente diferentes (**Figura 1**), mientras que cuando la D_{ap} se redujo al año siguiente (**Tabla 1**), la K_s generada por Lab fue significativamente mayor (**Figura 1**).

Aoki & Sereno (2004) mencionaron para una microcuenca del sur de Córdoba, resultados distintos de K_s según estos fueran determinados mediante Sim, Da o Pdisco, al mismo tiempo que García *et al.* (2000) comprobaron en un Haplusol típico, franco limoso y con 5 años bajo siembra directa, diferencias en esta propiedad al ser medida con Da y Pdisco. Aoki & Sereno (2004) señalaron que Da genera un disturbio en el suelo durante su instalación y que si bien no está representado en el proceso de infiltración el efecto de la gota de lluvia, hay una incidencia de la carga hidráulica impuesta sobre el suelo, la que puede

generar un proceso de degradación física superficial. Dichos autores afirmaron que con Sim, el proceso de infiltración se encuentra más representado por el efecto del impacto de la gota de lluvia sobre el suelo, mientras que con el permeámetro de disco la infiltración está regulada por el tamaño y la continuidad de los poros. Paz González *et al.* (2001) mencionaron que los valores de K_s obtenidos con permeámetro de Guelph y de disco son parcialmente comparables, en la medida que si bien los dos consideran el flujo tridimensional del agua, con el primero la medición se realiza en el interior del suelo, mientras que con el segundo se hace sobre su superficie.

En el presente trabajo, los valores de K_s generados por DA y Sim no fueron diferentes, independientemente del contenido inicial de la humedad superficial y del valor de la D_{ap} del suelo. Este instrumental presenta un área de trabajo similar, ambos fuerzan el movimiento de agua en la dirección vertical del suelo, generan un disturbio superficial ya sea por el impacto de la gota de lluvia o por la carga hidráulica impuesta, habiendo sido afectados los resultados de K_s de ambos por el contenido hídrico inicial del suelo. Contrariamente, y pese a que Guelph y Da mostraron una correlación significativa en sus resultados, los determinados con el primer equipo mencionado fueron siempre mayores, no respondieron al contenido inicial de agua en el suelo pero si a su densificación, siendo el área de influencia del proceso de infiltración y la dirección del flujo en ambos equipos distinta. Debido a esto último y ante la presencia de poros orientados horizontalmente, como es común observar en los sistemas bajo siembra directa (Sasal *et al.*, 2006; Soracco *et al.*, 2010), el flujo tridimensional generado con el permeámetro de Guelph no captó en forma tan efectiva dicha limitación al movimiento vertical del agua y como consecuencia sus resultados siempre fueron mayores a los aportados por Da y Sim. Los valores de K_s estimados mediante Pdisco no se vincularon significativamente con los de ninguna de las otras técnicas evaluadas, mostrando a su vez coeficientes de correlación negativos pero sin significancia estadística con el resto. Las mediciones realizadas con este equipo son el resultado de lo que ocurre en

un estrato de suelo muy superficial, dado que el movimiento de agua no se encuentra confinado. Por lo tanto, los valores de K_s generados por Pdisco reflejan las características edáficas de una porción del suelo, que debido al proceso de estratificación ocurrido en el sistema siembra directa, presenta características diferentes a lo observado a mayor profundidad. A su vez, el grado de disturbio provocado por este equipo sobre el suelo es mínimo, comparado con lo que ocurre con Sim, Da, Guelph y Lab. No obstante estas consideraciones, los resultados de K_s generados por Pdisco nunca fueron estadísticamente diferentes respecto a los hallados con Guelph. Por último, las mediciones realizadas con cilindro en laboratorio, presentaron diferencias respecto al resto en la medida que el entramado original de poros fue afectado, al ser los cilindros extraídos de su entorno de suelo más profundo, no existiendo a su vez la posibilidad de presencia de aire atrapado en su interior que dificulte el movimiento de agua. Este diferente condicionamiento, dio como resultado que el flujo de agua en el extremo inferior del cilindro no tuvo impedimentos, y por lo tanto la K_s medida con Lab presentó siempre los mayores resultados.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los presupuestos planteados, los resultados obtenidos en el presente trabajo se podrían agrupar en tres categorías de acuerdo al flujo de agua dominante que genera cada una de las técnicas analizadas: vertical (Sim y Da), tridimensional (Guelph y Pdisco) y libre en la parte inferior del suelo, sin la presencia de aire atrapado (Lab), aumentando en ese mismo orden el valor de la K_s estimada. A su vez, y si bien no existieron diferencias significativas entre los resultados aportados por Guelph y Pdisco, la diferente profundidad afectada por dicho instrumental, determinó valores numéricos mayores de K_s para el último procedimiento mencionado, dada la peor condición física del suelo subsuperficial. Por su parte, el aumento de la D_{ap} provocó que la K_s determinada mediante Lab no se diferenciara estadísticamente de los resultados generados con Guelph y Pdisco, mientras que cuando se comprobó una disminución en la densificación del suelo,

la K_s de Lab fue superior a la estimada con los otros dos equipos. De esta manera, los resultados aportados por Sim y Da serían más realistas ante la presencia de estructuras laminares formadas en los estratos subsuperficiales del suelo, lo mismo que responderían en mayor medida a cambios ocurridos en la humedad edáfica superficial. Los valores de K_s obtenidos con Guelph y Pdisco, al generarse en parte con el flujo horizontal del agua, serían mayores respecto a los determinados con Sim y Da para aquellas situaciones en que hay una dificultad en el flujo vertical del agua. Por su parte, y si bien los valores de K_s aportados por Lab serían más sensibles ante una densificación del suelo, la extracción de la muestra de su entorno original, generaría los resultados mayores y menos realistas.

Como consecuencia del presente estudio, también se pudo observar que la K_s medida a campo presentó en general valores muy bajos. Esta característica favorece el incremento en el coeficiente de escurrimiento, con la consecuente concentración del flujo de agua que escurre superficialmente y que genera procesos de erosión en surcos y cárcavas, los cuales han aumentado en la región bajo estudio. Estos bajos valores de K_s responden a la degradación estructural del suelo, la cual quedó en evidencia en la caracterización física del suelo analizado.

AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por proyecto UBACyT 20020130100670BA.

BIBLIOGRAFÍA

- Angulo-Jaramillo, R; J P Vandervaere; S Roulier; J L Thony; J P Gaudet & M Vauclin. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments. *Soil Till. Res.* 55: 1-29.
- Aoki, A M & R Sereno. 2004. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo, estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. En: R Filgueira & F Micucci (Eds). *Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría*. Editorial de la Universidad de La Plata. 159-180 pp.
- Arya, L M; T S Dierolf; A Sofyan; I P G Widjaja-Adhi & M Th van Genuchten. 1998. *Field Measurement of the satu-*

- rated hydraulic conductivity of a macroporous soil with unestable subsoil structure. *Soil Sci.* 163: 841–852.
- Asgarzadeh, H; M R Mosaddeghi; A A Mahboubi; A Nosrati & A R Dexter. 2010. Soil water availability for plants as quantified by conventional available water, least limiting water range and integral water capacity. *Plant Soil* 335:229–244.
- Austin, A T; G Piñeiro & M Gonzalez-Polo. 2006. More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry*. 79: 45-60.
- Blake, G R & K H Hartge. 1986. Bulk density. En: A Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1, 2nd ed*, Agronomy. 9: 363-375.
- Casas, R & G F Albarracín. 2015. el deterioro del suelo y el ambiente en Argentina. Fundación para la Ciencia y la Cultura FeCiC. Buenos Aires. Argentina. 608 pp.
- Castiglioni, M G; M E Mendive Álvarez; J Cordoba; M Ochoa & D Mazzoni. 2010. Cambios en la porosidad y distribución de poros asociados a causas edáficas y por el uso de la tierra. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario. Argentina.
- Castiglioni, M G; M C Sasal; M Wilson & J D Oszust. 2018. Seasonal variation of aggregate stability, porosity and infiltration during a crop sequence under no tillage. *Terra Latinoamericana* 36: 199-209.
- Chagas, C I; F B Kraemer; S Utin; C Irurtia & O J Santanoglia. 2011. influencia de las propiedades edáficas y la posición en el paisaje sobre la respuesta hidrológica de suelos pertenecientes a una cuenca de la pampa ondulada. *Cuadernos del CURIHAM* 17: 15-24.
- Cosentino, D & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- Deb, S K & M K Shukla. 2012. Variability of hydraulic conductivity due to multiple factors. *Am. J. Env. Sci.* 8: 489-502.
- Dexter, A R. 2004. Soil physical quality. Part I: Theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Di Rienzo, J A; F Casanoves; M G Balzarini; L Gonzalez; M Tablada & C W Robledo. 2015. InfoStat. Grupo InfoStat. FCA. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Di Rienzo, J; F Casanoves; L Gonzalez; E Tablada; M Díaz; C Robledo & M Balzarini. 2001. *Estadística para las Ciencias Agropecuarias*. 4ta Ed. Triunfar. Córdoba. Argentina.
- Elrick, D E; W D Reynolds & K A Tan. 1989. Hydraulic conductivity measurements in the unsaturated zone using improved well analyses. *Ground Water Monit. Rev.* 9:184-193.
- García, J; R Corbella; G Sanzano & G Fadda. 2000. Distribución del agua del suelo en sistemas de siembra directa en cultivo de soja. 11° Conferencia de la Organización Internacional de la Conservación del suelo. Bs. As. Actas en CD Rom.
- Gardner, W H. 1986. Water content. En: A Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2ed. Agronomy Series. ASA. Inc. SSSA. Inc. publisher. Madison. WI. USA. 493-544 pp.
- Gregorich, E G; W D Reynolds; J L B Culley; M A McGovern & W E Curnoe. 1993. Changes in soil physical properties with depth in a conventionally tilled soil after no-tillage. *Soil Till. Res.* 26: 289–299.
- Gupta, R K; R P Rudra; W T Dickinson; N K Patni & G J Wall. 1993. Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods. *T. Am. Soc. Agr. Eng.* 36: 51–55.
- Irurtia, C B & R Mon. 1994. Microsimulador de lluvia para determinar infiltración a campo. Instituto de Suelos. CIRN INTA Castelar. Publicación Técnica 176.18 pp.
- Irurtia, C; R Berón; O Costamagna & A Glave. 1988. Provincia de Buenos aires. En: A Prego (ed.). *El deterioro del ambiente en la República Argentina*. Prosa-FeCiC. 55-64 pp.
- Jury, W A. 1986. Spatial variability of soil properties. En: S C Hern & S M Melancon (Eds.) *Vadose zone modeling of organic pollutants*. Lewis Publishers. Chelsea. MI. 245–269 pp.
- Klute, A. 1986. Water Retention: Laboratory Methods. En: A Klute (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. 2nd Ed. Agronomy. 9: 635-662.
- Klute, A & C Dirksen. 1986. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. En: A Klute (ed.). *Part 1. Methods of soil analysis*. 2nd Ed. Agronomy. 9: 687-734.
- Kraemer, F B; C Chagas; G Marré; E A Palacín & O J Santanoglia. 2013. El desplazamiento de la ganadería por la agricultura en una cuenca representativa de la Pampa Ondulada: efectos sobre el escurrimiento superficial y la erosión hídrica. *Ciencia del Suelo* 31:83-92.
- Kraemer, F B; M A Soria; M G Castiglioni, M Duval; J Galantini & H Morrás. 2017. Morphostructural evaluation of various soils subjected to different use intensity under no-tillage. *Soil Till. Res.* 169: 124–137.
- Kraemer, F B. 2015. Influencia de la granulometría y la mineralogía en el comportamiento hidro-físico y estructural en suelos con distinta intensidad y secuencia de cultivos bajo siembra directa. PhD Tesis. Escuela para Graduados Alberto Soriano. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Kruskal, W H & W A Wallis. 1952. Use of ranks on one-criterion variance analysis. *J Am. Stat. Assoc.* 47: 583-621.

- Lilly, A. 1994. The determination of field-saturated hydraulic conductivity in some Scottish soils using the Guelph permeameter. *Soil Use Manag.* 10: 72-78.
- Lin, H K; J Mc Innes; L P Wilding & C T Hallmark. 1998. Macroporosity and initial moisture effects on infiltration rates in Vertisols and vertic intergrades. *Soil Sci.* 163:2-8.
- Logsdon, S D & D L Karlen. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil Till. Res.* 78: 143-149.
- Mallants, D; P Binayak; B P Mohanty; A Vervoort & J Feyen. 1997. Spatial analysis of saturated hydraulic conductivity in a soil with macropores. *Soil Technol.* 10:115-131.
- Paz González, A; I Thonon; F C Bertolani; M M Taboada Castro; E Vidal Vázquez & J Dafonte Dafonte. 2001. Variabilidad espacial de la infiltración en una ladera determinada con permeámetro de Guelph e infiltrómetro de tensión. En: J J López & M Quemada (Eds). *Temas de Investigación en Zona no Saturada. Vol 5.* Pamplona.
- Restovich, S B; M J Torti; D A Colombini & A E Andriulo. 2010. Evolución de algunas propiedades físicas y químicas edáficas durante la implementación de cultivos de cobertura en la secuencia soja maíz. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Rosario.
- Reynolds, W D & D E Elrick. 2005. Measurement and Characterization of Soil Hydraulic Properties. En: J Alvarez-Benedí & R Muñoz Carpena (Eds). *Soil water solute process characterization. An integrated approach.* CRC Press. Chapter 6. 197-147 pp.
- Reynolds, W D; B T Bowman; R R Brunke; C F Drury & C S Tan. 2000. Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 478-484.
- Reynolds, W D; D E Elrick & E G Youngs. 2002. Ring or cylinder infiltrometers (vadose zone). En: J H Dane & G C Topp (Eds). *Methods of Soil Analysis: Part 4. Physical Methods.* Soil Science Society of America. Inc. Madison. WI. 818-843 pp.
- Reynolds, W D; C F Drury; C S Tan; C A Fox & X M Yang. 2009. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma* 152: 252-263.
- Salverda, A P & J H Dane. 1993. An examination of the Guelph permeameter for measuring the soil's hydraulic properties. *Geoderma* 57: 405-421.
- Sasal, M C; A E Andriulo & M A Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Sasal, M C; M G Castiglioni & M G Wilson. 2010. Effect of crop sequences on soil properties and runoff on natural rainfall erosion plots under no tillage. *Soil Till. Res.* 108: 24-29.
- Shukla, M K. 2011. *Soil Hydrology, Land Use and Agriculture: Measurement and Modelling.* 1st Edn. CABI. Wallingford. Oxfordshire. 448 pp.
- Smettem, K R J; J Y Parlange; P J Ross & R Haverkamp. 1994. Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer: 1 A capillary based theory. *Water Resour. Res.* 30: 2925-2929.
- Soracco C G; L A Lozano; G O Sarli; P R Gelati & R R Filgueira. 2010. Anisotropy of Saturated Hydraulic Conductivity in a soil under conservation and no till treatments. *Soil Till. Res.* 109: 18-22.
- Stengel, P. 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. *Annales Agronomiques* 30:27-51.
- Stengel, P. 1988. Análisis de la porosidad en horizontes de un suelo Brunizem en distintas condiciones de manejo y su relación con el crecimiento de las raíces del Maíz. Informe Técnico N° 211. INTA Pergamino.
- Stockton, J G & A W Warrick. 1971. Spatial variability of unsaturated hydraulic conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 35: 847-848.
- Tuller, M; D Or & L M Dudley. 1999. Adsorption and capillary condensation in porous media: Liquid retention and interfacial configurations in angular pores, *Water Resour. Res.* 35: 1949-1964.
- van Genuchten, M Th; F J Liej & SR Yates. 1991. The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. USDA. US Salinity Laboratory. Document EPA/600/2-91/065. Riverside. CA. USA.
- van Genuchten, M Th. 1980. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44: 892- 898.
- Vandervaere, J P; M Vauclin & D E Elrick. 2000. Transient flow from tension infiltrometers: I. The two-parameter equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64:1263-1272.
- Zhou, X; H S Lin & E A White. 2008. Surface soil hydraulic properties in four soil series under different land uses and their temporal changes. *Catena* 73: 180-188.
- Zimmermann, A; D S Schinn; T Francke; H Elsenbeer; B Zimmermann. 2013. Uncovering patterns of near-surface saturated hydraulic conductivity in an overland flow-controlled landscape. *Geoderma* 195-196: 1-11.