

## 24. Aguas

### **Dinámica hídrica en el suelo. Variabilidad temporal bajo Siembra Directa y Labranza Convencional**

Otero, María Florencia; Bastarrica, Julián; Salazar, María Paz; Villarreal, Rafael  
oteromariaf@gmail.com; jbastarrica@gmail.com; paz.salazar@hotmail.com;  
rafaevillarreal@gmail.com

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Universidad Nacional de La Plata

---

#### **Resumen**

La adopción de la Siembra Directa (SD) genera cambios en la configuración del sistema poroso, teniendo un gran impacto en las propiedades hidráulicas, que a su vez pueden variar dentro del ciclo de cultivo. Los objetivos de este trabajo son: i- determinar distintas propiedades físicas e hidráulicas del suelo en el sitio de estudio bajo SD y Labranza Convencional a lo largo de los ciclos de cultivo para determinar su variación temporal; ii- Analizar el efecto del sistema de labranza sobre las distintas propiedades hidráulicas y la configuración del sistema poroso y su relación con la variación temporal durante el ciclo de cultivo. Los resultados encontrados muestran que, en general, el suelo bajo LC mostró mayores valores de macroporosidad, conductividad hidráulica saturada y conectividad de poros, en comparación con el suelo bajo SD. Estas diferencias fueron mayores durante la época estival, debido al efecto de la actividad biológica y radical, y luego de realizada la labranza. El tratamiento SD mostró valores más estables de las variables estudiadas en comparación con LC. Estos cambios temporales en las propiedades hidráulicas deberían ser considerados en la modelización del flujo de agua y transporte de solutos.

**Palabras clave:** Conductividad hidráulica, porosidad del suelo, infiltración

#### **Introducción**

La Siembra Directa (SD) es un tipo de labranza conservacionista que consiste básicamente en una sola pasada de sembradora, en la cual el suelo y los residuos superficiales son mínimamente

disturbados. En este sistema se eliminan todas las preparaciones previas de la cama de siembra habitualmente hechas bajo Labranza Convencional (LC) a excepción de la apertura de un surco delgado, u hoyos, para colocar las

semillas, y lograr un adecuado contacto semilla-suelo.

La superficie cultivada bajo el sistema de siembra directa (SD) se ha incrementado en forma continua en los últimos años. Argentina es uno de los países con mayor superficie cultivada bajo ese sistema, totalizando, aproximadamente, unos 280.000 km<sup>2</sup>. Esto constituye alrededor del 70% de la superficie agrícola del país (AAPRESID, 2015).

Los cambios en la configuración del sistema poroso en suelos bajo SD comparados con suelos labrados tienen un gran impacto en las propiedades hidráulicas (Green et al., 2003), encontrándose resultados distintos e incluso contradictorios, variando de acuerdo al tipo de suelo, escala de observación y momento de muestreo. Por un lado, se ha reportado un aumento en la capacidad de infiltración de los suelos bajo sistemas conservacionistas (Shipitalo y Edwards, 1993, Ankeny et al., 1995, Stone y Schlegel, 2010, Presley et al., 2012), relacionado a la creación de bioporos conectados verticalmente y a una mayor estabilidad estructural. Sin embargo, varios autores reportaron una disminución de los valores de la conductividad hidráulica saturada ( $K_0$ ) bajo SD, en comparación con suelos bajo LC (Messing y Jarvis, 1993; Sasal et al., 2006, Alvarez et al., 2009; Lozano et al., 2014). A nivel local se ha encontrado, en un rango amplio de texturas, menores tasas de infiltración bajo SD en

comparación con suelos labrados, especialmente en suelos limosos con desarrollo de estructura laminar superficial (Ferrerías et al., 2000, Sasal et al., 2006, Alvarez et al., 2009, Soracco et al., 2010, Lozano et al., 2014). Bajo LC, algunos estudios reportan un aumento de la  $K_0$ , la macroporosidad en distintos tipos de suelos luego de realizada la labor, que progresivamente disminuye durante el ciclo de cultivo (Angulo-Jaramillo et al., 1997, Azevedo et al., 1998, Bormann y Klaassen, 2008). Álvarez et al. (2009) encontró por el contrario que el aumento en las tasas de infiltración generadas por el efecto del laboreo persisten hasta el fin de ciclo del cultivo. En cuanto al volumen de poros hidráulicamente activos, Schwen et al. (2011) encontraron diferencias en la mesoporosidad, siendo mayor bajo SD en comparación con LC. A su vez, a partir del análisis de la relación entre  $K$  y la macro y mesoporosidad efectiva, mencionaron que el sistema poroso del suelo bajo SD presentó menor tortuosidad y mayor conectividad vertical que la LC. Resultados similares fueron reportados en Argentina por Imhoff et al. (2010), quienes encontraron mayores valores de macroporosidad efectiva bajo SD que bajo LC. Contrariamente, Soracco et al. (2018) mencionan que la labranza produce un aumento de la macroporosidad efectiva en comparación con suelos bajo SD, pero dicho efecto no persiste hasta el final de la cosecha.

Varios autores han reportado que la variación temporal de las propiedades hidráulicas durante el ciclo de cultivo pueden ser comparables a la variación causada por la labranza, los cultivos o el uso de la tierra (Angulo-Jaramillo et al., 1997, Strudley et al., 2008, Alletto y Coquet, 2009, Hu et al., 2009, Schwen et al., 2011), aunque no siempre es tenida en cuenta. Dicha variabilidad temporal está sujeta a los cambios que puede sufrir la estructura del suelo durante el ciclo de cultivo (Strudley, 2008). En general estos cambios se deben a la consolidación de los suelos (producto de presiones externas o lluvias), la actividad biofísica de las raíces y los ciclos de humedecimiento y secado (Jirku et al., 2013).

En cuanto a las propiedades físicas de capacidad, Schwen et al. (2011) reportaron una gran variabilidad temporal de la macroporosidad en suelos bajo SD. A su vez, estos autores mencionan una relativa estabilidad durante el ciclo de cultivo en la pendiente de la CRH, contrariamente a lo encontrado por Jirku et al. (2013) quienes mencionan una elevada variabilidad temporal en ambos parámetros, especialmente bajo LC. Peña-Sancho et al. (2017) reportaron un efecto significativo de la labranza sobre la CRH y sus parámetros relacionados. Estos autores observaron también una disminución en la DAP del suelo bajo LC, mencionando que el primer evento de precipitación significativo luego de la

labranza, es el principal factor que modifica la CRH del suelo.

Por el lado de los indicadores dinámicos, algunos autores han reportado una disminución de la  $K_0$  durante la temporada de crecimiento del cultivo, debido al efecto del sellado producto de las lluvias (Messing y Jarvis, 1993, Murphy et al., 1993, Suwardji y Eberbach, 1998). Contrariamente, varios autores encontraron un aumento en la  $K_0$  y la macroporosidad del suelo durante el ciclo de crecimiento, atribuido a una mayor agregación de los suelos producto del crecimiento radical y otras actividades biológicas (Bormann y Klaasen, 2008). Schwen et al. (2011) mostraron que la  $K_0$  disminuyó fuertemente luego de la labranza durante el invierno, asociado al sellado producido por las precipitaciones. Esta disminución fue seguida de un incremento gradual durante la primavera debida principalmente a la actividad biológica. A su vez, estos autores encontraron que la variabilidad temporal de la  $K_0$  fue menor en SD comparado con LC, pero sin mostrar una dinámica sistemática a lo largo de diferentes ciclos de cultivo. Por el contrario, algunos autores han reportado la estabilización de las distintas propiedades físicas bajo SD luego de un periodo de 5 años (Wander y Bollero, 1999; Rhoton, 2000; Álvarez et al., 2009). Estos cambios durante el ciclo de cultivo en las propiedades hidráulicas y en la configuración del sistema poroso, pueden tener impacto en la dinámica de

solutos (Kodešová et al., 2008), y debe tenerse en cuenta a la hora de modelar la dinámica hídrica en el suelo (Schwen et al., 2011).

El estudio de la dinámica temporal de las propiedades Físicas del suelo durante el ciclo del cultivo bajo Labranza Convencional y Siembra Directa es fundamental para el estudio de la problemática del movimiento del agua en el mismo. Por esto hipotetizamos que: i- Las propiedades físicas e hidráulicas que describen el movimiento del agua y la configuración del sistema poroso del suelo varían temporalmente durante el ciclo de cultivo; ii- Suelos bajo SD continua presentan menor variación temporal de las propiedades hidráulicas y del sistema poroso del suelo en comparación con suelos bajo LC.

### **Objetivos**

Los objetivos de este trabajo son: i- Determinar distintas propiedades físicas e hidráulicas del suelo en el sitio de estudio bajo SD y LC a lo largo de los ciclos de cultivo para determinar su variación temporal; ii- Analizar el efecto del tipo de suelo y sistema de labranza sobre las distintas propiedades hidráulicas y la configuración del sistema poroso y su relación con la variación temporal durante el ciclo de cultivo.

## **Materiales y Métodos**

### **Sitios y tratamientos**

El estudio se realizó en la EEA Pergamino (33° 57' S, 60° 33' O), Prov. de Bs. As. Se trata de un Argiudol típico de la serie Pergamino (INTA, 1972). Es de familia fina, térmica e illítica. La precipitación anual en el lugar es de 947 mm. Es de textura franco limoso, con predominio de arcillas illíticas y esmectitas. Se trata de un ensayo de más de 34 años de duración, con un diseño experimental en bloques apareados con dos tratamientos: Siembra Directa (SD) y Labranza Convencional (LC). La rotación de cultivos es maíz-trigo/soja de segunda. La labranza comprende arado de rejas y vertedera como labranza primaria y rastra de disco y de dientes como secundaria a una profundidad de 20 cm. Se realizó el seguimiento de un cultivo de soja RR de segunda entre los meses de noviembre de 2016 y julio de 2017. En la tabla 1 se detallan los momentos de muestreo de las distintas propiedades estudiadas.

Tabla 1. Determinaciones realizadas durante el ciclo de cultivo: Presiembra (Noviembre 2015, previo cosecha de trigo); Cultivo (Enero 2017, soja V2; Febrero 2017, soja V6; Mayo 2017, soja R5) y Poscosecha (Julio 2017, un mes después de la cosecha).

Fecha	K (h), DTPo, $\epsilon$ , Cw	CO*, pH*, CIC*
Nov 2016	x	x
Ene 2017	x	x
May 2017	x	x
Jul 2017	x	x

DTPa, distribución de tamaño de partículas; CIC, capacidad de intercambio catiónico; SE, superficie específica; CO, carbono orgánico, K (h) conductividad hidráulica a distintas tensiones, DTPo, distribución de tamaño de poros;  $\epsilon$ , porosidad efectiva.

### Propiedades químicas

Se determinó el contenido de carbono orgánico (CO), pH y capacidad de intercambio catiónico (CIC), en cada tratamiento en los distintos momentos de muestreo a lo largo del ciclo de cultivo, según las tabla 1. Se tomaron tres muestras compuestas (conformadas por 10 submuestras tomadas aleatoriamente) para tratamiento y momento de muestreo. El pH del suelo fue determinado con un electrodo utilizando una relación suelo-agua de 1:2,5 (Nelson y Sommers, 1982). Se determinó el CO a través del método de Walkey y Black (1934). Se determinó la CIC según Chapman (1965).

### Infiltración a campo, conductividad hidráulica y porosidad efectiva

En todos los momentos se determinó la infiltración a campo a través del infiltrómetro de disco a tensión (Perroux y White, 1988) (Figura 1).

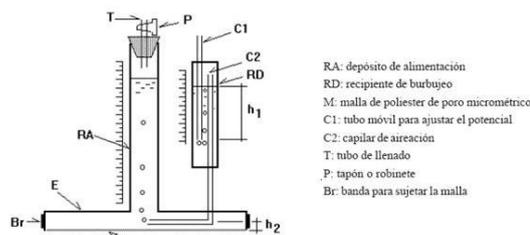


Figura 1. Esquema del infiltrómetro de disco a tensión. El diámetro del disco es de 120 mm (Extraído de Lozano, 2014).

Se realizaron 5 repeticiones por fecha de muestreo, en sitios elegidos al azar dentro de cada tratamiento, 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. La superficie fue alisada con una espátula y 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 básica se calculó en base a estas últimas cuatro mediciones. La conductividad hidráulica,  $K$ , a diferentes tensiones de entrega de agua ( $K_0$  y  $K_3$ ), fueron calculadas en base a la infiltración acumulada usando el método de las cargas múltiples (Ankeny et al., 1991) a partir de los datos de las tasas de infiltración básica.

### Porosidad efectiva

La porosidad efectiva se define como la fracción de poros del suelo que aporta al flujo de agua. A partir de los valores de  $K(h)$  obtenidos, se determinó la porosidad efectiva de acuerdo a la ecuación según Watson y Luxmoore (1986). La infiltración a tensiones de -3 y -6 cm excluye poros con diámetros equivalentes mayores a 1 y a 0,5 mm, respectivamente. Se definió macroporosidad efectiva ( $\epsilon_{ma}$ ) como aquellos poros drenando a  $h$  mayores que -3 cm ( $r > 0,5$  mm), y mesoporosidad efectiva ( $\epsilon_{me}$ ) a los que drenan a  $h$  entre -3 y -6 cm ( $0,5 \text{ mm} > r > 0,25$  mm) (Lozano, 2014).

### Distribución de tamaño de poros y densidad aparente

Se extrajeron 10 muestras indisturbadas de suelo en cilindros de acero inoxidable de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura en cada sitio (volumen,  $98 \text{ cm}^3$ ), tratamiento y momento de muestreo. Dichas muestras se llevaron hasta saturación y se las sometió a distintas tensiones (-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). Se calculó la fracción correspondiente a los macroporos ( $\theta_{ma}$ , diámetro  $> 60$  mm) y mesoporos ( $\theta_{me}$ ,  $30 \text{ mm} < \text{diámetro} < 60 \text{ mm}$ ) como la relación entre la masa de agua retenida en esos poros y el volumen de la muestra ( $1 \text{ g} = 1 \text{ cm}^3$ ).

La función de retención hídrica del agua está dada por Van Genuchten (1980):

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

Donde  $\theta_r$  y  $\theta_s$  representan el contenido de agua residual y saturado, respectivamente [ $\text{L}^3 \text{L}^{-3}$ ], y  $\alpha$  [ $\text{L}^{-1}$ ],  $n$ , y  $m$  ( $= 1 - 1/n$ ) son parámetros empíricos (parámetros de VG). Los datos obtenidos se ajustaron utilizando el código RETC (van Genuchten 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 y momento de muestreo. Se determinó la densidad aparente ( $D_{ap}$ ,  $\text{Mg m}^{-3}$ ) a partir de la siguiente ecuación (Hillel, 1998):

$$D_{ap} = \frac{m}{V_T} \quad (2)$$

Donde  $m$  es la masa seca en estufa a  $105^\circ\text{C}$  durante 48 horas y  $V_T$  es el volumen de la muestra.

A partir de los valores determinados de  $D_{ap}$ , se calculó la porosidad total del suelo (PT):

$$PT = 1 - \left( \frac{D_{ap}}{D_{real}} \right) \quad (3)$$

Donde  $D_{real}$  es la densidad real del suelo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ), determinada con picnometría (2,55 para el sitio de estudio).

### Conectividad de poros

Se determinó el índice de conectividad de poros ( $C_w$ ) basado en el flujo de agua según Lozano et al. (2013). Se calculó para cada familia de poros con radio entre  $a$  y  $b$  ( $r_a > r_b$ ), como la relación entre  $K(h_a)$ -

$K(h_b)$  (donde  $h_b$  y  $h_a$  son las tensiones correspondientes a las cuales los poros con radio equivalente mayores a  $a$  y  $b$  respectivamente, drenan) y la fracción de volumen que dicha familia ocupa:

$$C_{W_{ra-rb}} = \frac{K(h_a) - K(h_b)}{\theta(h_a) - \theta(h_b)} \quad (4)$$

Se determinó así el  $C_w$  para la porosidad total ( $C_{wPT}$ ), para la macroporosidad grande ( $d > 1$  mm,  $C_{wma}$ ) y para la mesoporosidad ( $1 < \text{diámetro} < 0.5$  mm,  $C_{wme}$ ). El volumen de cada familia de poros fue determinado a partir del ajuste de la curva de retención hídrica.

### Análisis estadístico

Se realizó un ANOVA multifactorial con labranza y momento de muestreo como factores para cada propiedad hidráulica estudiada. Debido a que los valores de  $K$ ,  $\epsilon$  y  $C_w$  no presentan distribución normal, fueron transformados en valores logarítmicos de base  $e$ .

Se realizó un test LSD Fisher para comparar las medias obtenidas. Todos los análisis se realizaron con un nivel de significancia de  $p = 0,05$ . Se utilizó el software estadístico SigmaPlot®.

### Resultados y Discusión

#### Propiedades químicas

No se observó efecto del momento de muestreo para ninguna de las propiedades químicas estudiadas ( $p > 0,05$ ). En la tabla 2 se muestran los resultados de los valores medios

observados de las propiedades estudiadas durante el ciclo de cultivo.

Tabla 2. Valores medios de carbono orgánico (CO), pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC) durante el ciclo de cultivo para los distintos sistemas de labranza (Siembra Directa, SD; Labranza Convencional, LC).

Labranza	Profundidad	CO	pH	CIC
		%	-	meq 100 g <sup>-1</sup>
SD	0-10 cm	1,76 a	5,78 a	16,30 a
LC	0-10 cm	1,75 a	5,74 a	17,23 a

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre labranzas.

No se observaron diferencias significativas entre tratamientos ( $p > 0,05$ ) en ninguna de las propiedades químicas estudiadas. Estos resultados están en desacuerdo por lo reportado por diferentes autores, quienes mencionan un aumento del CO en suelos bajo SD, en comparación con LC (Lal, 1997, Strudley et al., 2008, Álvarez y Steinbach, 2009). Según varios autores (Logan et al., 1991, Thomas et al., 2007) esta variación en el contenido de CO bajo SD puede derivar en menores valores de pH y de la CIC del suelo, contrariamente a lo observado en este trabajo.

### Variabilidad temporal de las distintas propiedades físicas e hidráulicas.

#### Distribución de tamaño de poros y densidad aparente

Los valores medios de las distintas propiedades hidráulicas basadas en indicadores de capacidad para labranza y momento de muestreo se muestran en la tabla 3 y figura 2.

Tabla 3. Valores medios de las distintas propiedades físicas (porosidad total, PT; macroporosidad,  $\theta_{ma}$ ; mesoporosidad,  $\theta_{me}$ ; Densidad aparente, Dap) para los distintos sistemas de labranza (Siembra Directa, SD; Labranza Convencional, LC) y momentos de muestreo. Los valores entre paréntesis indican los coeficientes de variación (CV, %).

Fecha y Labranza	DAP	PT	$\theta_{ma}$	$\theta_{me}$
	Mg m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>
Nov-16-SD	1,23ab (5,04)	0,52bc (4,56)	0,07c (46,99)	0,02a (29,20)
Nov-16-LC	1,20ab (2,09)	0,53bc (1,79)	0,12bc (30,12)	0,02a (10,55)
Ene-17-SD	1,18b (1,49)	0,54ab (1,23)	0,14b (22,12)	0,02a (12,30)
Ene-17-LC	1,17b (2,25)	0,54ab (1,83)	0,21a (30,07)	0,01a (34,75)
May-17-SD	1,26a (2,96)	0,51c (2,79)	0,12bc (20,83)	0,02a (18,38)
May-17-LC	1,32a (3,05)	0,48c (3,14)	0,14b (16,17)	0,01a (4,23)
Jul-17-SD	1,25a (2,43)	0,51c (2,27)	0,12bc (42,22)	0,02a (2,29)
Jul-17-LC	1,13b (8,73)	0,56a (6,71)	0,17a (17,34)	0,02a (4,77)

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las distintas medias para cada propiedad (test LSD Fisher).

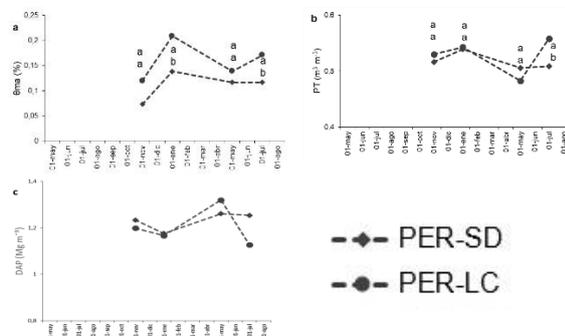


Figura 2. Indicadores físicos basados en propiedades de capacidad (macroporosidad,  $\theta_{ma}$  (a); Porosidad Total, PT (b); Densidad aparente, Dap (c)) durante los períodos estudiados para Siembra Directa (SD) y Labranza Convencional (LC).

La PT fue estable durante el ciclo de cultivo estudiado, sin mostrar diferencias entre labranzas, excepto en Julio 2017 donde el tratamiento LC mostró mayores valores luego de realizada la labranza (Tabla 2). Ambos sistemas de labranza mostraron un incremento de la  $\theta_{ma}$  durante

el periodo de primavera-verano (Noviembre 2016 – Enero 2017), con una posterior disminución en Mayo de 2017 y un incremento en Julio de 2017 luego de realizada la labranza bajo LC; mientras que bajo SD se observaron valores constantes entre Enero y Julio de 2017 (Figura 2-a). Los incrementos de la  $\theta_{ma}$  observados durante la época estival pueden atribuirse a una mayor actividad biológica y radical en esta época, ya reportado por otros autores en suelos estructurados (Schwen et al., 2011, Jirku et al., 2013). No se observaron diferencias significativas entre tratamientos y momentos de muestreo para  $\theta_{me}$ , debido a que los efectos inducidos por las labranzas generalmente tienen efecto en los poros de mayor diámetro (Cameira et al., 2003, Alletto y Coquet, 2009, Imhoff et al., 2010, Soracco et al., 2010).

La Dap mostró un comportamiento inverso a la PT, mostrando los mayores valores bajo SD (Figura 2.3-g, h, i). Estos resultados están de acuerdo con lo reportado por otros autores (Moret y Arrúe, 2007, Peña-Sancho et al., 2017), y en especial en suelos finos de la Región Pampeana (Taboada et al., 2008, Álvarez y Steinbach, 2009). Este comportamiento suele asociarse a la consolidación gradual de la matriz del suelo debido a la ausencia de una descompactación anual producto del laboreo (Moret y Arrúe, 2007).

### Conductividad hidráulica, porosidad efectiva y conectividad de poros

Los valores medios de las variables derivadas de los ensayos de infiltración a campo se muestran en la tabla 3. Se observaron mayores valores de  $K_0$ ,  $K_3$ ,  $\epsilon_{ma}$ ,  $\epsilon_{me}$ ,  $CW_{PT}$ ,  $CW_{ma}$ , bajo LC, especialmente en el periodo de cultivo.

Tabla 3. Valores medios de las distintas propiedades físicas basados en la dinámica hídrica (Conductividad hidráulica saturada,  $K_0$ ; conductividad hidráulica a -3 cm de tensión,  $K_3$ ; macroporosidad efectiva,  $\epsilon_{ma}$ ; mesoporosidad efectiva,  $\epsilon_{me}$ ; conectividad de las distintas familias de poros,  $CW_{PT}$ ,  $CW_{ma}$  y  $CW_{me}$ ) para cada momento de muestreo y tipo de labranza (Siembra Directa, SD; Labranza Convencional, LC) para el sitio Pergamino (PER). Los valores entre paréntesis indican los coeficientes de variación (CV, %).

Fecha y Labranza	$K_0$ cm h <sup>-1</sup>	$\epsilon_{ma}$ %	$\epsilon_{me}$ %	$CW_{PT}$ cm h <sup>-1</sup>	$CW_{ma}$ cm h <sup>-1</sup>
Nov-16-SD	1,57b (34,44)	0,0009ab (49,07)	0,0010b (29,78)	2,98b (42,93)	89,96ba (77,89)
Nov-16-LC	1,27bc (39,01)	0,0007ab (56,20)	0,0009b (54,37)	2,37b (44,52)	39,57b (52,82)
Ene-17-SD	0,92c (47,91)	0,0005bc (63,80)	0,0006c (36,25)	1,66c (55,59)	103,65ab (19,77)
Ene-17-LC	2,88a (57,81)	0,0016a (96,19)	0,0022a (35,75)	5,44a (57,79)	38,24b (25,01)
May-17-SD	0,47c (0,14)	0,0003c (6,80)	0,0003c (14,14)	0,91c (2,76)	91,92ab (44,86)
May-17-LC	1,36b (52,37)	0,0009bc (73,95)	0,0008b (59,76)	2,79b (55,00)	56,64b (55,16)
Jul-17-SD	1,37b (45,78)	0,0010ab (53,50)	0,0004c (30,39)	2,59bc (51,44)	193,99a (66,19)
Jul-17-LC	2,79a (33,98)	0,0018a (48,33)	0,0014a (31,13)	3,94a (14,62)	120,80a (52,59)

Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre las distintas medias para cada propiedad (test LSD Fisher).

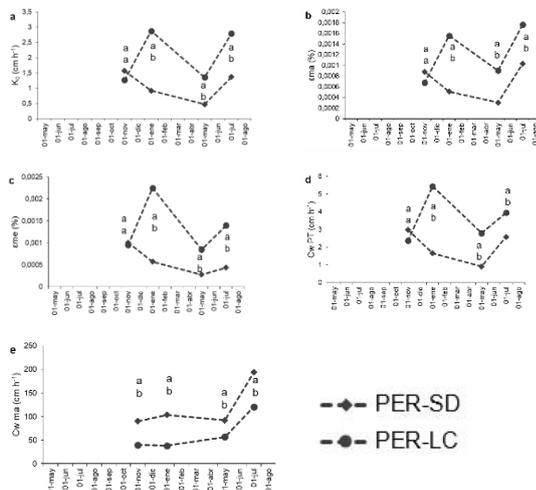


Figura 3. Indicadores físicos basados en la dinámica hídrica (Conductividad hidráulica saturada,  $K_0$  (a); macroporosidad efectiva,  $\epsilon_{ma}$  (b); mesoporosidad efectiva,  $\epsilon_{me}$  (c); conectividad de las distintas familias de poros,  $CW_{PT}$  y  $CW_{ma}$  (d y e) durante los períodos de tiempo estudiados para Siembra Directa (SD) y Labranza Convencional (LC).

Se observaron mayores valores de  $K_0$ ,  $\epsilon_{ma}$ ,  $\epsilon_{me}$ ,  $CW_{PT}$ ,  $CW_{ma}$ , bajo LC, especialmente en el periodo de cultivo estudiado (soja), excepto al final del cultivo de trigo (antecesor), donde se observaron valores similares entre tratamientos. Schwen et al. (2011) reportaron diferencias entre labranzas solo en el rango de los mesoporos, pero en favor de la LC, contrariamente a lo aquí reportado. Los valores más bajos para todas las variables hidráulicas estudiadas fueron observadas bajo SD. Los resultados están de acuerdo con lo encontrado por Álvarez et al. (2009), quienes encontraron tasas de infiltración similares en suelos francos, mientras que en suelos finos, la infiltración fue mayor en suelos bajo LC. Esta tendencia puede atribuirse, en este caso, a la presencia de estructura laminar bajo SD en estos sitios, caracterizada por agregados planos y finos orientados paralelamente a la superficie del suelo (Sasal et al., 2006). Este tipo de estructura está relacionada con bajas tasas de infiltración (Lozano, 2014). El desarrollo de esta anomalía ha sido ampliamente reportado en suelos con alto contenido de limo bajo SD en diferentes sitios de la región Pampeana (Bonel et al., 2005; Sasal et al., 2006; Álvarez et al., 2009;

Soracco et al., 2010, Lozano et al., 2013, Sasal et al., 2017).

Se observó un aumento de  $K_0$ , durante la primavera y verano, decayendo hacia los meses de otoño e invierno, atribuido a un aumento de la actividad biológica del suelo y del sistema radical (Jirku et al., 2013), siguiendo un comportamiento similar a la  $\theta_{ma}$ . En el sitio de estudio, esta tendencia se observó solo bajo LC, mientras que el tratamiento SD mostró una disminución de dichas variables durante el ciclo de cultivo (Figura 3). Estos resultados están de acuerdo con lo reportado por Alletto y Coquet (2009) quienes además de encontrar mayores valores de  $K_0$  bajo LC con respecto a suelos bajo sistemas conservacionistas, encontraron una fuerte influencia del momento de muestreo. Estos mismos autores mencionan que los valores de  $K_0$  observados bajo SD fueron más estables bajo sistemas de labranza conservacionistas. Miller et al., (1998) concluyó que el tiempo que transcurre entre la labranza y el muestreo presenta una gran influencia sobre los valores de  $K$  que se obtengan.

La macro y mesoporosidad efectiva y la conectividad de poros, dependieron del momento de muestreo, mostrando en general un comportamiento similar a la  $K$ . Bajo SD, los valores de  $\varepsilon_{ma}$  mostraron un comportamiento similar a la  $K_0$ , disminuyendo a lo largo del periodo estudiado con un incremento en Julio de 2017 (Figura 3); la  $\varepsilon_{me}$  se mantuvo

constante entre Noviembre de 2016 y Enero de 2017, disminuyendo hacia el final del ciclo de cultivo (Figura 3); los valores de  $C_{WPT}$  se mantuvieron constantes durante el periodo estudiado, excepto en Mayo de 2017 donde se observó una disminución, mientras que la  $C_{Wma}$  mostró un incremento luego de la cosecha (Figura 3). Los incrementos antes mencionados de  $\varepsilon_{ma}$  y  $C_{Wma}$ , junto con el de  $K_0$ , luego de la cosecha pueden atribuirse al efecto de la degradación de raíces. Sharma et al. (2016) reportó que la macroporosidad y la agregación del suelo bajo SD es generada por la degradación de las raíces, promoviendo la continuidad y conectividad de dichos macroporos. El tratamiento LC mostró un comportamiento similar entre las variables  $K_0$ ,  $\varepsilon_{ma}$ ,  $\varepsilon_{me}$  y  $C_{WPT}$ . Estas variables incrementaron entre Noviembre 2016 y Enero de 2017, con una disminución en Mayo de 2017 y un posterior incremento en Julio de 2017 luego de realizada la labranza (Figuras 3). Los incrementos en Enero y Julio de 2017 pueden atribuirse, como se mencionó anteriormente, a un incremento de la actividad biológica en el suelo y al efecto de la labranza, respectivamente. Estos resultados están en desacuerdo con diversos autores que mencionan que la labranza causa una interrupción en la continuidad y conectividad de la porosidad del suelo (Logsdon et al., 1990, Imhoff et al., 2010, Sharma et al., 2016). El aumento observado de la  $C_{Wma}$  bajo LC

luego de labor, soportan esta idea (Figura 3).

Los resultados anteriormente mencionados muestran la necesidad de evaluar los efectos de los distintos sistemas de labranzas en simultáneo con el momento de muestreo para una correcta interpretación de sus efectos sobre las distintas propiedades hidráulicas (Lozano et al., 2013).

### Conclusiones

Las propiedades físicas e hidráulicas del suelo presentan variación temporal dentro del ciclo de cultivo, siendo afectadas por el tipo de labranza. Suelos bajo LC presentan generalmente mayores valores de conductividad hidráulica a distintas tensiones, macroporosidad efectiva, conectividad de poros y macroporosidad, especialmente luego de la labranza. Suelos bajo SD tienden a presentar valores menores y más estables durante el ciclo de cultivo en comparación con suelos bajo LC, con incrementos durante el periodo vegetativo. Estos cambios temporales en las propiedades hidráulicas deberían ser considerados en la modelización del flujo de agua.

Propiedades físicas basadas en propiedades de capacidad como PT, DAP y  $\theta_{ma}$  en general no fueron capaces de distinguir el efecto de la de las labranzas, presentando valores similares en la mayoría de las fechas. De los resultados se desprende la necesidad de incluir variables físicas basadas en la dinámica

hídrica, especialmente la que describan la conectividad del sistema poroso.

### Bibliografía

-AAPRESID, 2015.

<http://www.fyo.com/noticia/142434/xxii-congreso-anual-aapresid-mision-cumplida>.

-Alletto, L., & Coquet, Y. (2009). Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma*, 152(1-2), 85-94.

-Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Gutierrez Boem, F. H., Bono, A., Fernandez, P. L., & 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

-Alvarez, R., & Steinbach, H. S. (2009). A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*, 104(1), 1-15

-Angulo-Jaramillo, R., Thony, J. L., Vachaud, G., Moreno, F., Fernandez-Boy, E., Cayuela, J. A., & Clothier, B. E. (1997). Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 61(1), 27-32

-Ankeny, M. D., Ahmed, M., Kaspar, T. C., & Horton, R. (1991). Simple field method for determining unsaturated hydraulic

conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 55(2), 467-470

-Ankeny, M. D., Kaspar, T. C., & Prieksat, M. A. (1995). Traffic effects on water infiltration in chisel-plow and no-till systems. *Soil Science Society of America Journal*, 59(1), 200-204

-Azevedo, A. S., Kanwar, R. S., & Horton, R. (1998). EFFECT OF CULTIVATION ON HYDRAULIC PROPERTIES OF AN IOWA SOIL USING TENSION INFILTRATION METERS<sup>1</sup>. *Soil Science*, 163(1), 22-29.

-Bonel, B. A., Morrás, H. J. M., & Bisaro, V. (2005). Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del suelo*, 23(1), 1-12.

-Bormann, H., & Klaassen, K. (2008). Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. *Geoderma*, 145(3-4), 295-302

-Cameira, M. R., Fernando, R. M., & Pereira, L. S. (2003). Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. *Soil and Tillage Research*, 70(2), 131-140.

-Chapman, H. D. (1965). Cation-exchange capacity 1. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, (methodsofsoilab), 891-901

-Ferreras, L. A., Costa, J. L., Garcia, F. O., & Pecorari, C. (2000). Effect of no-tillage

on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil and Tillage research*, 54(1-2), 31-39

-Green, T. R., Ahuja, L. R., & Benjamin, J. G. (2003). Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*, 116(1-2), 3-27

-Hillel, D. (1998). *Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations*. Elsevier.

-Hu, W., Shao, M., Wang, Q., Fan, J., & Horton, R. (2009). Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. *Geoderma*, 149(3-4), 355-366

-Imhoff, S., Kay, B. D., Da Silva, A. P., & Hajabbasi, M. A. (2010). Evaluating responses of maize (*Zea mays* L.) to soil physical conditions using a boundary line approach. *Soil and Tillage Research*, 106(2), 303-310

-Jirků, V., Kodešová, R., Nikodem, A., Mühlhanslová, M., & Žigová, A. (2013). Temporal variability of structure and hydraulic properties of topsoil of three soil types. *Geoderma*, 204, 43-58

-Kodešová, R., Kočárek, M., Kodeš, V., Šimůnek, J., & Kozák, J. (2008). Impact of soil micromorphological features on water flow and herbicide transport in soils. *Vadose Zone Journal*, 7(2), 798-809.

-Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO<sub>2</sub>-enrichment. *Soil and Tillage Research*, 43(1-2), 81-107.

- Logan, T. J., Lal, R., & Dick, W. A. (1991). Tillage systems and soil properties in North America. *Soil and Tillage Research*, 20(2-4), 241-270.
- Logsdon, S., Allmaras, R. R., Wu, L., Swan, J. B., & Randall, G. W. (1990). Macroporosity and its relation to saturated hydraulic conductivity under different tillage practices. *Soil Science Society of America Journal*, 54(4), 1096-1101
- Lozano, L. A., Germán Soracco, C., Buda, V. S., Sarli, G. O., & Filgueira, R. R. (2014). Stabilization of soil hydraulic properties under a long term no-till system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(4), 1281-1292
- Lozano, L. A., Soracco, C. G., Cornelis, W. M., Gabriels, D., Sarli, G. O., & Villarreal, R. (2013). Anisotropy of pore size classes' connectivity related to soil structure under no tillage. *Soil Science*, 178(11), 612-617
- Messing, I., & Jarvis, N. J. (1993). Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers. *European Journal of Soil Science*, 44(1), 11-24
- Miller, J. J., Sweetland, N. J., Larney, F. J., & Volkmar, K. M. (1998). Unsaturated hydraulic conductivity of conventional and conservation tillage soils in southern Alberta. *Canadian journal of soil science*, 78(4), 643-648.
- Moret, D., & Arrúe, J. L. (2007). Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil and Tillage Research*, 96(1-2), 103-113.
- Murphy, B. W., Koen, T. B., Jones, B. A., & Huxedurp, L. M. (1993). Temporal variation of hydraulic properties for some soils with fragile structure. *Soil Research*, 31(2), 179-197
- Nelson, D. W., & Sommers, L. (1982). Total carbon, organic carbon, and organic matter1. *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties*, (methodsofsoilan2), 539-579.
- Peña-Sancho, C., López, M. V., Gracia, R., & Moret-Fernández, D. (2017). Effects of tillage on the soil water retention curve during a fallow period of a semiarid dryland. *Soil Research*, 55(2), 114-123
- Perroux, K. M., & White, I. (1988). Designs for Disc Permeameters 1. *Soil Science Society of America Journal*, 52(5), 1205-1215
- Presley, D. R., Sindelar, A. J., Buckley, M. E., & Mengel, D. B. (2012). Long-term nitrogen and tillage effects on soil physical properties under continuous grain sorghum. *Agronomy journal*, 104(3), 749-755
- Rhoton, F. E. (2000). Influence of Time on Soil Response to No-Till Practices Contribution from the USDA-ARS Natl. Sedimentation Lab. *Soil Science Society of America Journal*, 64(2), 700-709.
- Sasal, M. C., Andriulo, A. E., & 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

- Sasal, M. C., Boizard, H., Andriulo, A. E., Wilson, M. G., & Léonard, J. (2017). Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil and Tillage Research*, 173, 33-41
- Schwen, A., Bodner, G., Scholl, P., Buchan, G. D., & Loiskandl, W. (2011). Temporal dynamics of soil hydraulic properties and the water-conducting porosity under different tillage. *Soil and Tillage Research*, 113(2), 89-98
- Sharma, V., Sharma, K. R., Sharma, N., Phogat, V. K., & Vikas, V. (2016). Impact of Conservation Tillage on Soil Organic Carbon and Physical Properties—a Review.
- Shipitalo, M. J., & Edwards, W. M. (1993). Seasonal patterns of water and chemical movement in tilled and no-till column lysimeters. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1), 218-223
- Soracco, C. G., Lozano, L. A., Sarli, G. O., Gelati, P. R., & 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
- Soracco, C. G., Lozano, L. A., Villarreal, R., Melani, E., & Sarli, G. O. (2018). Temporal Variation of Soil Physical Quality under Conventional and No-Till Systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42
- Stone, L. R., & Schlegel, A. J. (2010). Tillage and crop rotation phase effects on soil physical properties in the west-central Great Plains. *Agronomy Journal*, 102(2), 483-491.
- Strudley, M. W., Green, T. R., & Ascough II, J. C. (2008). Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*, 99(1), 4-48
- Swardji, P., & Eberbach, P. L. (1998). Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red Kandosol) after 16 years of direct drilling or conventional cultivation. *Soil and Tillage Research*, 49(1-2), 65-77
- Taboada, M. A., Barbosa, O. A., & Cosentino, D. J. (2008). Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loamy soils. *Soil Science*, 173(2), 130-142.
- Thomas, G. A., Dalal, R. C., & Standley, J. (2007). No-till effects on organic matter, pH, cation exchange capacity and nutrient distribution in a Luvisol in the semi-arid subtropics. *Soil and Tillage Research*, 94(2), 295-304.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils 1. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Van Genuchten, M. V., Leij, F. J., & Yates, S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils.
- Walkey, A., & Black, C. A. (1934). As estimation method for determination of soil organic matter and a proposed

modifications of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37, 1409-1421.

-Wander, M. M., & Bollero, G. A. (1999). Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Science Society of America Journal*, 63(4), 961-971.

-Watson, K. W., & Luxmoore, R. J. (1986). Estimating Macroporosity in a Forest Watershed by use of a Tension Infiltrometer 1. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 578-582.

### **Agradecimientos**

Los autores quieren agradecer al laboratorio de Edafología de la FCAyF por la ayuda en las determinaciones químicas de la UNLP y al INTA EEA-Pergamino por el acceso al sitio experimental.

### **Financiamiento**

El estudio se llevó adelante con fondos de la UNLP (PPID A004, 2014-2016; y PID A306, 2017-2018).