



UNIVERSIDAD  
NACIONAL  
DE LA PLATA



Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

## TRABAJO FINAL DE CARRERA

**Título del trabajo:** Efectos de los cultivos de cobertura en las propiedades hidráulicas del suelo y su relación con el flujo preferencial.

**Nombre del alumno:** Diego Armando Medina García    **DNI:** 41.857.356

**Número de legajo:** 28679/4    **Email:** diegoarmando.99mg@gmail.com

**Teléfono:** 2342403149

**Director:** Ing. Agr. Bellora, Guido Lautaro

**Codirector:** Dr. Lozano, Luis Alberto

**Fecha de entrega:** 16/2/2025

**Institución:** Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

**Lugar de trabajo:** LAFIS

**Modalidad:** Investigación.

**Área temática:** Ciencia del suelo.

## **Resumen**

En las últimas décadas se ha dado una simplificación de los sistemas agrícolas en nuestro país, con impactos negativos en la calidad física del suelo. La inclusión de cultivos de cobertura (CC) en la rotación podría servir para mitigar estos efectos. En el presente trabajo final de carrera se evaluó la inclusión de cultivos de cobertura, frente a barbechos desnudos y como afecta las propiedades hidráulicas del suelo en un Argiudol de la región Pampeana y su efecto en la generación de vías de flujo preferencial. Este estudio fue llevado en la Chacra Experimental Integrada Manantiales (MDA-INTA). En el muestreo se tomaron muestras de suelo sin disturbar en cilindros de plástico (5 cm x 5 cm) de cada tratamiento y en 3 posiciones distintas (línea (L), entre entrelínea (EEL) y entrelínea (EL)) y muestras de suelo disturbadas. Luego en el laboratorio se realizaron ensayos de mini-infiltración y se construyó la curva de retención hídrica (CRH). Los resultados indicaron que no hubo diferencias significativas para la conductividad hidráulica ( $K(h)$ ). Para la porosidad no hubo interacciones entre tratamiento y posición. Los macroporos aumentaron en el tratamiento con cobertura (BC) en la línea (L). Los mesoporos también se incrementaron en el tratamiento BC. Por último, los microporos fueron mayores en el tratamiento de barbecho desnudo (BD) en EL. Se concluyó que la inclusión de CC incrementó la porosidad y modificó la distribución de tamaño de poros, pero no modificó el fenómeno de FP debido a la falta de variabilidad en la  $K(h)$ .

## 1- INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la expansión e intensificación de los sistemas agro productivos ha sido el camino para satisfacer la demanda creciente de alimentos (Olson et al., 2017). Con la adopción del paquete tecnológico brindado por la revolución verde se implementó la siembra directa, incrementándose el uso de fertilizantes inorgánicos, herbicidas y variedades transgénicas resistentes (Brainerd & Menon, 2014). En nuestro país, se implementó un sistema agrícola simplificado, con escasez de rotaciones y pérdida de sistemas mixtos agro-ganaderos, evolucionando hacia sistemas de agricultura continua (Crespo et al., 2022). Esto trajo modificaciones en la calidad del suelo, viéndose afectadas las características físicas y químicas del mismo, disminución de carbono orgánico del suelo (COS), pérdida de nutrientes y biodiversidad. Se ha reportado una merma de la calidad física del suelo (CFS) en la Región Pampeana bajo estos sistemas, afectando procesos claves como la infiltración (Soracco et al., 2019), la retención del agua (Behrends Kramer et al., 2022; Villarreal et al., 2020) y alteraciones en la geometría y estabilidad del sistema de poros (Behrends Kraemer et al., 2021; Villarreal et al., 2022). Varios autores reportaron aumentos en la densidad aparente ( $D_p$ ) y en la resistencia a la penetración en sistemas bajo SD, pudiendo generar disminución en el rendimiento de los cultivos (Álvarez & Steinbach, 2009; Chagas et al., 1994; Díaz-Zorita et al., 2002; Domínguez et al., 2010; Lozano et al., 2013; Soracco et al., 2018). Se han propuesto alternativas de manejo para buscar mitigar y revertir estos procesos de degradación a través de la intensificación en las rotaciones. Una propuesta ha sido la incorporación de cultivos de cobertura invernales (CC) en lugar de barbechos desnudos. En la Región Pampeana se han reportado efectos positivos de la inclusión de CC sobre la actividad biológica del suelo, el contenido de COS (Restovich et al., 2012), la estabilidad de agregados (Sasal et al., 2017), la porosidad, la infiltración y la retención hídrica (Alvarez et al., 2017). Si bien los cambios en las propiedades físicas e hidráulicas se deben principalmente al manejo agrícola (e.g. labranza, secuencia de cultivos), el tipo de cobertura y sus sistemas radicales juegan un rol clave (Pulido-Moncada et

al., 2022). Las raíces de los distintos cultivos afectan las propiedades hidráulicas creando, ocupando y explorando el espacio poroso del suelo, modificando su conectividad (Bacq-Labreuil et al., 2018) incluso en el corto plazo (Chandrasekhar et al., 2018). Entre los procesos físicos se encuentran la reorientación de partículas, la oclusión de poros, el agrietamiento de agregados, el amalgamiento de microagregados y la creación de macroporos (Lu et al., 2020). Jotizankasa & Sirirattanachat (2017) mencionan que la presencia de raíces puede alterar el flujo de agua debido a la creación de poros estructurales intra-agregados. De esta manera, los cambios en la configuración del sistema poroso del suelo pueden generar flujo preferencial (FP) modificando la dinámica hídrica del suelo y la disponibilidad de agua para los cultivos (Beck-Broichsitter et al., 2020). El FP es el fenómeno por el cual el agua se mueve por vías preferenciales, no ingresando en la matriz del suelo (Jarvis, 2017), generando perfiles de humedecimiento desiguales (Nimmo, 2021). El FP en los suelos ha sido reconocido como un factor esencial que influye en el ciclo hidrológico, la erosión del suelo, la productividad agrícola, la calidad ambiental y muchos otros procesos biogeoquímicos y ecológicos (Guo & Lin, 2018; Hencher, 2010; Morales et al., 2010; Uhlenbrook, 2006). En los agroecosistemas, el FP puede acelerar el transporte de nutrientes y contaminantes a las napas (Clothier et al., 2008; Gerke et al., 2010). Larsbo et al. (2014) realizaron curvas de paso en suelos de diferentes texturas (franco, franco arcilloso y arcilloso), encontrando que el transporte de contaminantes se ve limitado en suelos con alta macroporosidad, atribuido a un incremento en la superficie específica de contacto entre la matriz del suelo y la red de macroporos. Cheng et al. (2017) realizaron un estudio en bajos saprolíticos de Panamá para entender el efecto del FP en la recarga del acuífero. Los resultados indicaron que el FP vertical es importante para su recarga, siendo los bioporos fundamentales para dicho proceso. El sistema radical de los diferentes cultivos puede generar cambios en la configuración del sistema poroso del suelo, modificando la dinámica hídrica según su arquitectura (Beck-Broichsitter et al., 2020). En la Región Pampeana se ha reportado una mayor conectividad horizontal de los poros, debido a la presencia de estructura laminar relacionada al monocultivo de soja bajo siembra directa (Lozano et al., 2013; Wilson et al., 2020). Por el contrario, en suelos agrícolas sin presencia de

estructura laminar el sistema de poros presenta generalmente una mayor conectividad en el sentido vertical (Lamandé et al., 2020). Cambios en la secuencia agrícola impactan en la configuración del sistema poroso del suelo debido a la generación de bioporos direccionalmente orientados de acuerdo con el desarrollo de la arquitectura del sistema radical (Zhang & Peng, 2021). El fenómeno de FP está condicionado por diversos factores, lo que hace que su abordaje sea extremadamente complejo (Jarvis, 2007). En este sentido, el FP dependerá tanto de características edáficas (red de macroporos, textura, actividad de la biota, características topográficas) como del manejo (cultivo, labranza, tráfico) (Jarvis, 2007). En la bibliografía se mencionan los diferentes factores que pueden controlar el FP; la cantidad de macroporos (Jarvis, 2007), las grietas en el suelo (Zhang et al., 2015), la estratificación por diferencias texturales entre los horizontes (Germann & Zimmermann, 2005) y el sellado de poros que pueden generar o bloquear vías de FP (Beven & Germann, 1982). En este sentido, las propiedades hidráulicas del suelo son determinantes en el fenómeno de FP, siendo su estudio fundamental (Sidle et al., 2001; Šimůnek et al., 2003). En el presente trabajo se estudió el efecto de la inclusión de CC sobre los factores que intervienen en la creación de vías de FP y su relación con las propiedades hidráulicas en la región Pampeana.

## **2- HIPÓTESIS**

- La inclusión de cultivos de cobertura en sistemas agrícolas bajo siembra directa mejora la dinámica hídrica y la distribución del tamaño de poros.
- La inclusión de cultivos de cobertura afecta el fenómeno de flujo preferencial.

## **3- OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Aportar al conocimiento sobre los efectos de los cultivos de cobertura sobre las propiedades físicas e hidráulicas del suelo y su impacto en la dinámica hídrica.

## **Objetivos**

- Evaluar el efecto de la inclusión de cultivos de cobertura, en comparación con barbechos desnudos, sobre las propiedades hidráulicas y físicas en un Argiudol de la Región Pampeana.
- Determinar el efecto de los cultivos de cobertura en comparación con barbechos desnudos, sobre la generación de flujo preferencial.

## **4- MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Sitio de estudio**

Los muestreos se realizaron en la Chacra Experimental Integrada Manantiales (MDA-INTA), ubicada en las cercanías de la localidad de Chascomús (35°44' S, 58°03' O). El suelo es un Argiudol abruptico, fino, illítico, térmico (Soil Survey Staff, 2010) de textura franca. El suelo pertenece a la serie Udaondo (INTA-SAGyP, 1990) y la secuencia de horizontes es: A (0–0,42 m), Ec (0,42–0,55 m), Bt (0,55–1,00 m), BC (1,00–1,35 m) y C (1,35+ m). El clima en la región es templado, con temperatura media anual 15,6 °C y precipitación anual promedio de 946 mm. Antes de que se estableciera el experimento, las parcelas estaban bajo SD con monocultivo de maíz (*Zea mays*) durante los últimos 10 años. En el año 2018 se instaló un ensayo con dos tratamientos: a) maíz bajo SD con un consociado de cebada (*Hordeum vulgare*) y vicia como CC (BC); y b) maíz bajo SD sin CC (BD). En ambos tratamientos el maíz se sembró con un distanciamiento de 50 cm entre líneas.

### **Muestreo**

A fin de evaluar los efectos de los CC se tomaron muestras no disturbadas de suelo para determinaciones en el laboratorio. Las muestras se extrajeron en cilindros de plástico de 5 cm de largo y 5 cm de diámetro. Se tomaron 15 muestras de suelo por tratamiento en tres posiciones equidistantes a 12,5 cm entre ellas (línea de siembra (L), entre entrelínea (EEL) y entrelínea (EL)) tomando 5 muestras por cada posición, en ambos tratamientos (BC y BD) para evaluar la heterogeneidad de las propiedades hidráulicas y detectar vías

de flujo preferencial. El FP se determinó a partir de diferencias en la conductividad hidráulica entre posiciones.

## **Determinaciones en laboratorio**

### Conductividad hidráulica

Las muestras se sometieron a ensayos de mini-infiltración (MI) en laboratorio. El dispositivo consiste en un tubo con un pequeño disco (con una membrana del mismo material que la base del infiltrómetro de disco a tensión (Perroux & White, 1988)) de 1 cm de radio conectado a un reservorio de agua. El depósito de agua se colocó en una balanza analítica ( $\pm 0,001$  g), conectada a una computadora. Cada muestra de suelo fue colocada en contacto con el disco. Las medidas de infiltración se realizaron a 3 valores de tensión  $h$  (6 cm, 3 cm, 0 cm). La tensión se consiguió elevando la muestra a una altura ( $h$ ) sobre el nivel del agua. Cada determinación demora unos 3 minutos en alcanzar el estado estacionario y la masa de agua que infiltra queda registrada en la balanza (como la variación de la masa) cada cinco segundos. La infiltración acumulada se determinó como la relación entre el volumen infiltrado y el área del disco. A partir de los datos obtenidos a las distintas tensiones se obtuvieron los valores de conductividad hidráulica a distintas tensiones ( $K_0$ ,  $K_3$  y  $K_6$ ) utilizando el método de cargas múltiples de Ankeny et al. (1991).

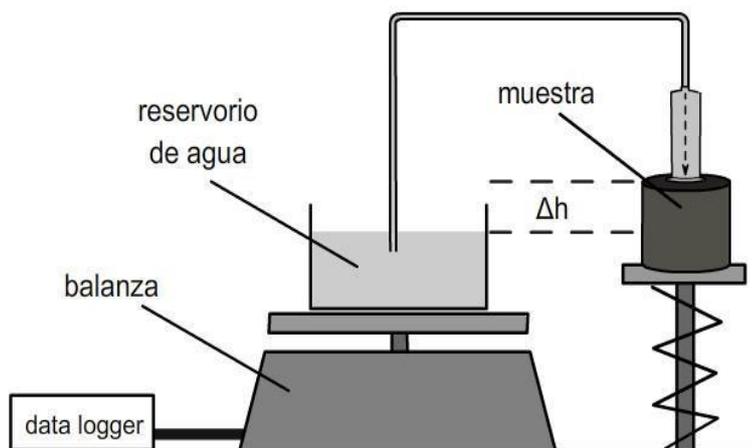


Figura 1. Set-up mini-infiltración

### Curva de retención hídrica

Una vez finalizada la determinación de mini-infiltración, se determinó la curva de retención hídrica y se derivó la distribución de tamaño de poros de cada muestra. Las muestras fueron saturadas con agua y sometidas a distintas tensiones (0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m y 1 m, en mesa de tensión y 7 m en olla de presión). Cada tensión (h) se relacionó con una familia de poros según la ecuación de ascenso capilar (Hillel, 1998).

### Análisis estadístico

Para determinar la influencia de los distintos tratamientos y la posición en las propiedades físicas e hidráulicas se realizó un ANOVA multifactorial, teniendo en cuenta las interacciones (Sokal & Rohlf, 1995). Para la comparación de medias se empleó la prueba de Fischer (LSD) ( $p < 0,05$ ). Todos los análisis se realizaron utilizando el software Infostat.

## **5- RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### **Porosidad del suelo**

En la tabla 1 se muestran los valores de porosidad para los distintos tratamientos y posiciones. En el ANOVA no se encontró interacción significativa entre los factores (tratamiento x posición) para ninguna de las familias de poros estudiada. Los macroporos fueron significativamente afectados por ambos factores, siendo mayores en BC y en la posición de la línea de cultivo (L) (Figura 2). Los mesoporos fueron afectados significativamente por el tratamiento, pero no por la posición, siendo significativamente mayores en BC. Los microporos fueron significativamente afectados por ambos factores, siendo mayores en BD y en la posición de entre entrelínea y entrelínea respecto a la línea de cultivo.

Bacq-Labreuil et al. (2018) encontraron que la inclusión de CC genera un incremento en la porosidad del suelo y modifica la distribución del tamaño de los mismos. Salazar et al. (2022) encontró un incremento en la mesoporosidad producto de la incorporación de CC (*Secale cereale L.*) pudiendo deberse a la formación de poros inter agregados producto de la actividad radical (Araya et al., 2022).

Tabla 1. Valores medios de porosidad ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) para las distintas porosidades por tratamiento (Con cultivo de Cobertura, BC; Sin Cultivo de Cobertura, BD); y posición (línea, L; entre entrelínea, EEL; y entrelínea, EL).

Tratamiento	Posición	Macroporos		Mesoporos		Microporos	
BC	L	0,20	b	0,06	a	0,33	a
	EEL	0,18	a B	0,06	a B	0,35	b A
	EL	0,18	a	0,05	a	0,36	b
BD	L	0,19	b	0,04	a	0,36	a
	EEL	0,14	a A	0,04	a A	0,42	b B
	EL	0,15	a	0,04	a	0,40	b

Letras minúsculas diferentes indican que hay diferencias significativas entre posiciones para un mismo tratamiento, letras mayúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

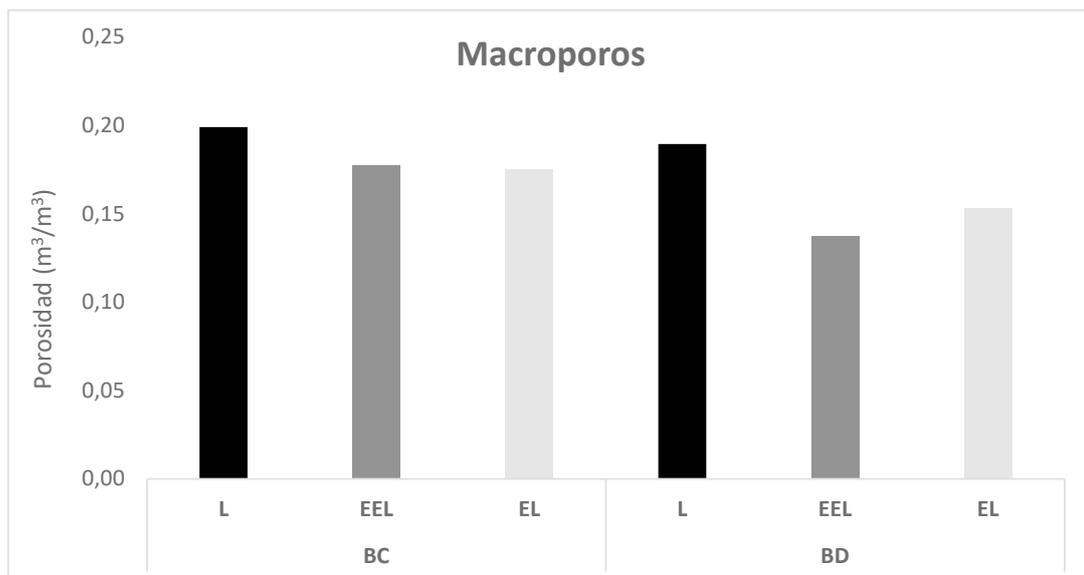


Figura 2. Macroporosidad ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ) según tratamiento (Con cultivo de Cobertura, BC; Sin Cultivo de Cobertura, BD); y posición (línea, L; entre entrelínea, EEL; y entrelínea, EL).

La macroporosidad fue mayor en el tratamiento con cobertura. Para ambos tratamientos la posición correspondiente a la línea de siembra fue la que presentó mayores valores, pudiendo deberse a la actividad radical del cultivo de verano (*Zea Mays*) (Basche et al., 2016; Calonego et al., 2017).

### Conductividad hidráulica

En la tabla 2 y figura 3 se muestran los valores de conductividad hidráulica a distintas tensiones ( $K_0$ ,  $K_3$ , y  $K_6$ ) para los distintos tratamientos y posiciones. No hubo efecto significativo de la interacción ni de los factores para ninguna de las  $K$ .

Tabla 2. Valores medios de conductividad hidráulica a distintas tensiones ( $K_0$ ,  $K_3$ ,  $K_6$ ) por tratamiento (Con cultivo de Cobertura, BC; Sin Cultivo de Cobertura, BD); y posición (línea, L; entre entrelínea, EEL; y entrelínea, EL).

Tratamiento	Posición	$K_0$	$K_3$	$K_6$
BC	L	6,97	1,57	0,65
	EEL	6,72	3,21	0,83
	EL	7,73	2,56	0,84
BD	L	6,50	2,50	1,09
	EEL	6,70	2,53	1,07
	EL	6,43	2,16	1,02

No hubo diferencias significativas para las conductividades hidráulicas a distintas tensiones lo cual no concuerda con lo reportado por Álvarez et al. (2017) quien indicó un incremento en la porosidad y la  $K(h)$  producto de la incorporación de CC. Esto puede deberse a la oclusión de poros generado por el cultivo de verano en concordancia con lo reportado por Villarreal et al. (2020), quien encontró variaciones en las porosidades y la  $K(h)$  a lo largo del ciclo de cultivo debido a los ciclos de crecimiento y degradación de las raíces.

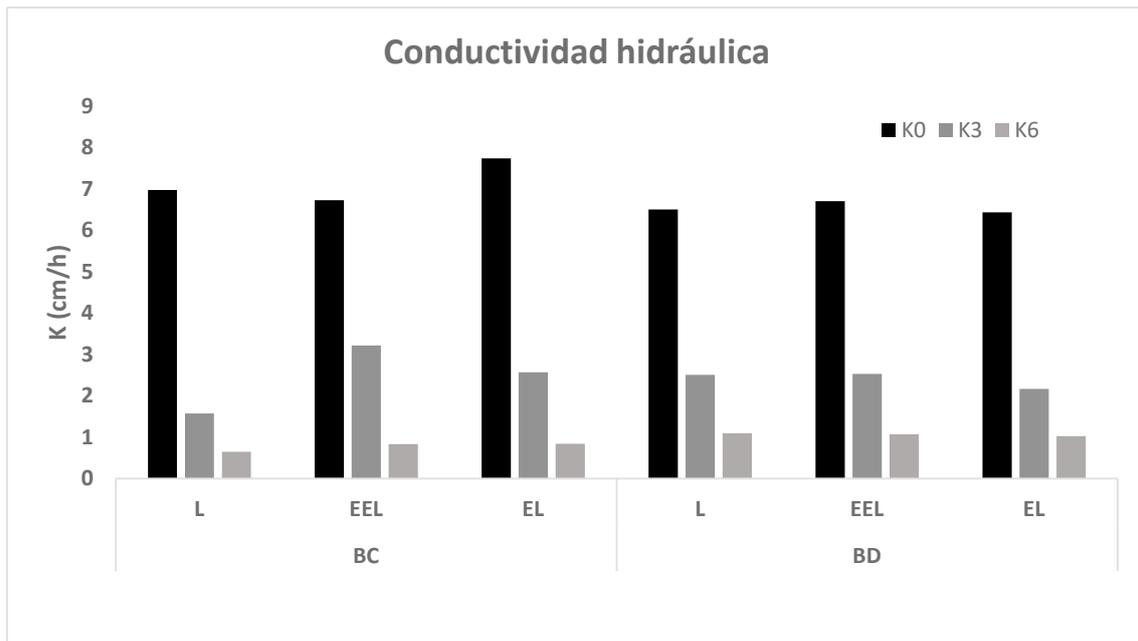


Figura 3. Conductividades a tres tensiones (6, 3 y 0 cm) según tratamiento y posición.

### Efecto de los cultivos de cobertura en el flujo preferencial.

El FP es el fenómeno por el cual el agua se mueve por vías preferenciales, no ingresando en la matriz del suelo (Jarvis, 2017), generando perfiles de humedecimiento desiguales (Nimmo, 2021). La falta de variabilidad para los tratamientos y las posiciones en la  $K(h)$  permiten inferir que la presencia del CC no modificó el fenómeno de FP para los tratamientos y posiciones más allá de haber un incremento en la macroporosidad, la cual se considera la familia de poros encargada de actuar como vías preferenciales (Nimmo, 2021). Esto puede deberse a una baja conectividad de los poros (Koestel et al., 2020) o a la oclusión de los mismos por las raíces del cultivo de verano (Villarreal et al., 2021). Es importante resaltar que el efecto de los distintos cultivos sobre las propiedades estudiadas y el fenómeno de FP son dinámicos en el tiempo, por lo que futuros estudios debería centrarse en estudiar esto a lo largo del ciclo de cultivo, y en distintos momentos de la rotación.

### CONCLUSION

La primera hipótesis se corrobora ya que la inclusión de cultivos de cobertura en sistemas agrícolas bajo siembra directa modificó la distribución y el tamaño de los poros. La segunda hipótesis no es aceptada ya que la falta de diferencias en la dinámica hídrica tanto entre tratamientos como en las posiciones indicaría que el FP no fue modificado debido a esta práctica. La inclusión de CC modificó la porosidad del suelo, este fenómeno se atribuye a la actividad radical tanto del cultivo de cobertura como del cultivo de verano, ya que las raíces maduras tienden a crear macroporos al morir y descomponerse, esto facilita el movimiento del agua resaltando la influencia significativa de la biología vegetal y su arquitectura en las propiedades físicas del suelo. Sin embargo, la falta de variabilidad espacial para la conductividad hidráulica indicaría una baja continuidad de los macroporos o una posible oclusión de los mismos ya que se encuentran ocupados con raíces activas evitando así el movimiento preferencial de agua desde la superficie a partes más profundas del perfil del suelo.

## 7- BIBLIOGRAFÍA

**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.

**Alvarez, R., Steinbach, H. S. & De Paepe, J. L.** 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 170, 53-65.

**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.

**Araya, S. N., Mitchell, J. P., Hopmans, J. W., & Ghezzehei, T. A.** 2022. Long-term impact of cover crop and reduced disturbance tillage on soil pore size distribution and soil water storage. *Soil*, 8(1), 177-198.

**Bacq-Labreuil, A., Crawford, J., Mooney, S. J., Neal, A. L., Akkari, E., McAuliffe, C., ... & Ritz, K.** 2018. Effects of cropping systems upon the three-dimensional architecture of soil systems are modulated by texture. *Geoderma*, 332, 73-83.

**Bacq-Labreuil, A., J. Crawford, S.J., Mooney, A.L. Neal. & K. Ritz.** 2019. Cover crop species have contrasting influence upon soil structural genesis and microbial community phenotype. *Sci. Rep.*, 9(1).

**Basche, A.D., Kaspar, T.C., Archontoulis, S.V., Jaynes, D.B., Sauer, T.J., Parkin, T.B., y Miguez, F.E.** 2016. Soil water improvements with the long-term use of a winter rye cover crop. *Agricultural Water Management*, 172, 40-50.

**Beck-Broichsitter, S., H.H. Gerke., M. Leue., P.J. von Jeetze. & R. Horn.** 2020. Anisotropy of unsaturated soil hydraulic properties of eroded Luvisol after conversion to hayfield comparing alfalfa and grass plots. *Soil Tillage Res.*, 198: 104553.

**Behrends Kraemer, F., H. Morrás., P.L. Fernández., M. Duval. & J. Galantini.** 2021. Influence of edaphic and management factors on soils aggregates stability under no-tillage in Mollisols and Vertisols of the Pampa Region, Argentina. *Soil Tillage Res.*, 209.

**Behrends Kraemer, F., M. Castiglioni., H. Morrás., P. Fernández. & C. Álvarez.** 2022. Pores size distribution and pores volume density of Mollisols and Vertisols under different cropping intensity managements with no-tillage. *Geoderma*, 405, 115398.

**Beven, K. & Germann, P.** 1982. Macropores and water flow in soils. *Water resources research*, 18(5), 1311-1325.

**Brainerd, E. & Menon, N.** 2014. Seasonal effects of water quality: The hidden costs of the Green Revolution to infant and child health in India. *Journal of Development Economics*, 107, 49-64.

**Calonego, J.C., Raphael, J.P., Rigon, J.P., de Oliveira Neto L., y Rosolem, C.A.** 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *European Journal of Agronomy*, 85: 31-37.

**Chandrasekhar, P., J. Kreiselmeier., A. Schwen., T. Weninger. & S. Julich.** 2018. Why we should include soil structural dynamics of agricultural soils in hydrological models. *Water (Switzerland)* 10(12).

**Chagas, C. I., H.J. Marelli. & O.J. Santanatoglia.** 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ciencia del suelo*, 12(1), 11-16.

**Cheng, Y., F. L. Ogden. & J. Zhu.** 2017. Earthworms and tree roots: A model study of the effect of preferential flow paths on runoff generation and groundwater recharge in steep, saprolitic, tropical lowland catchments. *Water Resources Research*, 53(7), 5400-5419.

**Clothier, B. E., S. R. Green. & M. Deurer.** 2008. Preferential flow and transport in soil: progress and prognosis. *European Journal of Soil Science*, 59(1), 2-13.

**Crespo, C., R.A. Corral., S.N. Diez., S.G. Delgado. & G.F. Domínguez.** 2022. Green bridge crops to manage corn nitrogen nutrition in the Southeastern Argentinean Pampas. *Soil Tillage Res.* 218. doi: 10.1016/j.still.2021.105311.

**Díaz-Zorita, M., G. A. Duarte. & J. H. Grove.** 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65: 1-18.

- Domínguez, A., J. C. Bedano. & A. R. Becker.** 2010. Negative effects of no-till on soil macrofauna and litter decomposition in Argentina as compared with natural grasslands. *Soil and Tillage Research*, 110(1), 51-59.
- Gerke, H. H., P. Germann. & J. Nieber.** 2010. Preferential and unstable flow: From the pore to the catchment scale. *Vadose Zone Journal*, 9(2), 207-212.
- Germann, P. F. & M. Zimmermann.** 2005. Directions of preferential flow in a hillslope soil, 1. Quasi-steady flow. *Hydrological Processes: An International Journal*, 19(4), 887-899.
- Guo, L. & H. Lin.** 2018. Addressing two bottlenecks to advance the understanding of preferential flow in soils. *Advances in agronomy*, 147, 61-117.
- Hillel, D.** 1998. Environmental Soil Physics. Academic Press, San Diego.
- Hencher, S. R.** 2010. Preferential flow paths through soil and rock and their association with landslides. *Hydrological processes*, 24(12), 1610-1630.
- INTA-SAGyP.** 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Provincia de Misiones, Vol. II, pp. 107-154.
- Jarvis, N. J.** 2007. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 523-546.
- Jotisankasa, A. & T. Sirirattanachai.** 2017. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function. *Canadian Geotechnical Journal*, 54(11), 1612-1622.
- Lamandé, M., P. Schjønning., N. Dal Ferro. & F. Morari.** 2020. Soil pore system evaluated from gas measurements and CT-images: a conceptual study using artificial, natural and 3D-printed soil cores. *Eur. J. Soil Sci.*
- Larsbo, M., J. Koestel. & N. Jarvis.** 2014. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(12), 5255-5269.
- Lozano, L.A., C.G. Soracco., W.M. Cornelis., D. Gabriels., G.O. Sarli. & R. Villarreal.** 2013. Anisotropy of pore size classes' connectivity related to soil structure under no tillage. *Soil Sci.* 178(11). doi: 10.1097/SS.0000000000000027
- Lu, J., Q. Zhang., A. D. Werner., Y. Li., S. Jiang. & Z. Tan.** 2020. Root-induced changes of soil hydraulic properties—A review. *Journal of Hydrology*, 589, 125203.
- Morales, V. L., J. Y. Parlange. & T.S. Steenhuis.** 2010. Are preferential flow paths perpetuated by microbial activity in the soil matrix. A review. *Journal of Hydrology*, 393(1-2), 29-36.
- Olson, K. R., M. Al-Kaisi., R. Lal. & L. W. Morton.** 2017. Soil ecosystem services and intensified cropping systems. *Journal of Soil and Water Conservation*, 72(3), 64A-69A.
- Perroux, K.M. & I. White.** 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52 (5), 1205-1215.

- Pulido-Moncada, M., S. Katuwal & L. J. Munkholm.** 2022. Characterisation of soil pore structure anisotropy caused by the growth of bio-subsoilers. *Geoderma* 409, 115571.
- Restovich, S. B., A. E. Andriulo. & S.I. Portela.** 2012. Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *F. Crop. Res.* 128, 62–70.
- Rohlf, F. J., & Sokal, R. R.** 1995. *Statistical tables.* Macmillan.
- Salazar, M. P., Lozano, L. A., Villarreal, R., Irizar, A. B., Barraco, M., Polich, N. G., & Soracco, C. G.** 2022. Capacity and Intensity Indicators to evaluate the effect of different crop sequences and cover crops on soil physical quality of two different textured soils from Pampas Region. *Soil and Tillage Research*, 217, 105268.
- Sasal, M.C., H. Boizard., A.E. Andriulo., M.G. Wilson. & J. Léonard.** 2017. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil Tillage Res.* 173, 33-41.
- Soil Survey Staff.** 2010. *Claves para la Taxonomía de Suelos*, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Side, R. C., S. Noguchi., Y. Tsuboyama. & K. Laursen.** 2001. A conceptual model of preferential flow systems in forested hillslopes: Evidence of self-organization. *Hydrological Processes*, 15(10), 1675-1692.
- Šimůnek, J., N. J. Jarvis., M. T. Van Genuchten. & A. Gärdenäs.** 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *Journal of hydrology*, 272(1-4), 14-35.
- Soracco, C. G., R. Villarreal., E. M. Melani., J. A. Oderiz., M. P. Salazar., M. F. Otero. & L. A. Lozano.** 2019. Hydraulic conductivity and pore connectivity. Effects of conventional and no-till systems determined using a simple laboratory device. *Geoderma*, 337, 1236-1244.
- Soracco, C. G., L. A. Lozano., R. Villarreal., E. Melani. & G. O. Sarli.** 2018. Temporal variation of soil physical quality under conventional and no-till systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 42, e0170408.
- Uhlenbrook, S.** 2006. Catchment hydrology-a science in which all processes are preferential.
- Villarreal, R., L. A. Lozano., N. Polich., M.P. Salazar., M. Barraco. & C.G. Soracco.** 2022. Cover crops effects on soil hydraulic properties in two contrasting Mollisols of Argentinean Pampas region. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2022,1-16.
- Villarreal, R., L.A Lozano., M.P. Salazar., G. L. Bellora., E.M. Melani., N. Polich. & C.G. Soracco.,** 2020. Pore system configuration and hydraulic properties. Temporal variation during the crop cycle in different soil types of Argentinean Pampas Region. *Soil Tillage Res.* 198, 104528.

**Wilson, M.G., A.E. Maggi., M.G. Castiglioni., E.A. Gabioud. & M.C. Sasal.** 2020. Conservation of ecosystem services in argiudolls of Argentina. *Agric.* 10(12): 1–21. doi: 10.3390/agriculture10120649.

**Zhang, Z. B., X. Peng., H. Zhou., H. Lin. & H. Sun.** 2015. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve. *Soil and Tillage Research*, 146, 53-65.

**Zhang, Z. & X. Peng.** 2021. Bio-tillage: A new perspective for sustainable agriculture. *Soil Tillage Res.* 206(December 2020): 104844. doi: 10.1016/j.still.2020.104844.