

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS Y FORESTALES



Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA

INFORME DE TRABAJO FINAL DE CARRERA

Efecto del tránsito agrícola en la anisotropía de las propiedades hidráulicas del suelo.

Trabajo Final de Carrera Modalidad Dúo

Alumno: Ariel Omar Rivero

DNI: 36916819

N° de Legajo: 28594/0

Correo electrónico: arielrv10@outlook.com

Alumno: Héctor Simons **DNI:** 32719846

N° de Legajo: 26844/0

Correo electrónico: agronsimons@gmail.com

Director: Dr. Rafael Villarreal

Co-director: Dr. C. Germán Soracco

Fecha de entrega: 28/06/2022

Lugar de trabajo: Área de Física Aplicada

RESUMEN

Debido al aumento de la población mundial, la agricultura se posiciona como un actor fundamental capaz de abastecer las demandas crecientes y sostenidas en el tiempo. Es así que Argentina juega un rol importante en la producción mundial dada sus características edafoclimáticas. Ello se traduce en un uso intensificado del suelo, generando alteraciones físicas y problemas de compactación. Este trabajo final de carrera se propone analizar diferentes propiedades físicas que permitan evidenciar dichos problemas. Para ello se realizó en la Estación Experimental Julio Hirschhorn (FCyF-UNLP) un ensayo de tráfico agrícola de distintas intensidades y en distintas situaciones de humedad del suelo, evaluando el efecto sobre las propiedades físicas y su anisotropía. Se realizó ensayos de infiltración a campo para determinar la conductividad hidráulica (K), y se extrajeron muestras indisturbadas del horizonte superficial en dirección vertical y horizontal. En estas muestras se determinó la densidad aparente, la curva de retención hídrica, la porosidad efectiva y la tasa de infiltración básica a distintas tensiones a través de ensayos de mini infiltración. Adicionalmente se determinó el contenido de carbono y la textura del horizonte superficial. Los valores de K no presentaron diferencias significativas, a excepción del tratamiento de diez pasadas en seco (10S) que arrojó mayores valores de K a 6 cm de tensión (K_6) respecto al tratamiento de diez pasadas en húmedo (10H). Los tratamientos con tránsito evidenciaron un aumento en los valores de densidad aparente (DAP). Los valores de porosidades efectivas, ϵ_{ma} y ϵ_{me} , no arrojaron diferencias significativas entre tratamientos. En cuanto a la determinación de la CRH, se observaron aumentos en la macroporosidad en sentido horizontal en condición de suelo húmedo. Los resultados obtenidos muestran que el tránsito en suelo húmedo altera la configuración y orientación del sistema poroso, produciendo una modificación en la dinámica hídrica, siendo mayor la K en sentido horizontal que vertical.

1- INTRODUCCION

Ante el crecimiento poblacional global, junto con fenómenos como el incremento en el ingreso per cápita y cambios en los hábitos alimenticios, se espera que la demanda de alimentos aumente entre 100 y 110 % para el año 2050 (Tilman et al., 2011). En la actualidad, la expansión e intensificación de los sistemas agroproductivos han sido el camino para satisfacer esta demanda creciente de alimentos (Olson et al., 2017). Sin embargo, la actual intensificación agrícola llevada adelante por los sistemas productivos convencionales puede impactar negativamente en el ambiente (Kleijn et al., 2019). Argentina se posiciona como uno de los mayores productores de la región, gracias a un incremento significativo de su producción en las últimas décadas, dado por el aumento del área cultivada y por un mayor rendimiento de los cultivos (Jobbagy et al., 2021).

Estos sistemas convencionales se caracterizan en general por una baja utilización de fertilizantes y mano de obra, un alto consumo de herbicidas, junto a un incremento en el tamaño de la maquinaria utilizada (Jobbagy et al., 2021). Particularmente, se ha reportado una merma de la calidad física de los suelos de la Región Pampeana bajo estos sistemas convencionales ocasionando problemas de compactación (Salazar et al., 2022), causada entre diversos factores por la alta intensidad del tráfico y la presión de los neumáticos del tractor sobre el suelo (García Rodríguez et al., 2020), afectando negativamente procesos claves como la infiltración (Soracco et al., 2019), la retención del agua (Behrends Kraemer 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), resultando esto en aumentos en la densidad aparente (DAP) (Tolon-Becerra et al., 2011; Pulido-Moncada et al., 2021). A su vez, el efecto de compactación puede variar tanto de un suelo a otro como en un mismo suelo, ya que dependen del contenido de humedad, del tamaño de las partículas minerales, del tamaño y de la forma de los agregados y del grado de consolidación alcanzado por el mismo (Ashburner y Sims, 1984). Con altos contenidos de agua, el suelo usualmente se deforma fácilmente, resultando en una leve compactación a menos que haya

tiempo y oportunidad para que el agua escape. Con suelos húmedos, bajo las cargas transitorias producidas por el tráfico y algunos aperos de labranza, puede haber encharcamiento, deformación, pérdidas de agregados y quizás algo de dispersión, pero poca pérdida de volumen de poros. Sin embargo, al secarse, el suelo se vuelve intrínsecamente más fuerte y la susceptibilidad a la compactación puede aumentar pues los poros más amplios, que se vacían primero, son relativamente débiles (García Rodríguez et al., 2020). En los suelos saturados la transmisión de las presiones producida con una carga es isotrópica, debido a la presencia de presiones neutras, es decir, el agua libre del suelo soporta parte de la carga. En estos casos la distribución espacial de las tensiones es homogénea semejante a las presiones hidrostáticas. Pero una vez desplazada el agua, la distribución de las tensiones es anisotrópica porque la propagación de las tensiones se efectúa por los puntos de contacto entre los sólidos (Horn, 1988; Horn y Lebert, 1994).

Los cambios producidos por el fenómeno de compactación en la configuración del sistema poroso del suelo pueden generar flujos preferenciales modificando la dinámica hídrica del suelo (Beck-Broichsitter et al., 2020). En la Región Pampeana se ha reportado una mayor conectividad horizontal de la porosidad, asociada al desarrollo de estructura laminar relacionada a procesos de compactación producto de secuencias de cultivo simplificadas, especialmente monocultivos de soja bajo siembra directa (Lozano et al., 2013; Wilson et al., 2020). Por el contrario, en suelos agrícolas sin compactar, el sistema de poros presenta generalmente una mayor conectividad en el sentido vertical (Lamandé et al., 2020). En este sentido, la degradación física del suelo afecta la configuración del sistema poroso del suelo y por lo tanto puede generar un cambio en la direccionalidad de las propiedades que dependen de él. Estas propiedades presentan anisotropía si son dependientes de la dirección, de lo contrario se consideraría isotrópica (Bear, 1972). La anisotropía generalmente se debe a la estructura del suelo, que puede ser laminar, columnar, etc., exhibiendo así un patrón de microporos o macroporos con un claro sesgo direccional (Dörner y Horn, 2009; Hillel, 1982). Algunos autores reportaron mayor conductividad hidráulica

saturada (K_0) en la dirección vertical que en la dirección horizontal (Peng y Horn, 2008; Pulido-Moncada et al., 2021; Soracco et al., 2015), particularmente en suelos bien estructurados. Otros autores han reportado mayor K_0 en dirección horizontal que en dirección vertical, principalmente para suelos estratificados y suelos compactados (Dörner y Horn, 2009) o por la presencia de agregados laminares orientados horizontalmente (Lozano et al., 2013; Soracco et al., 2010). Aunque la distribución del tamaño de poro no debería cambiar con la orientación del muestreo, ya que es una variable escalar, existen informes contradictorios en la literatura. Por ejemplo, Dörner y Horn (2006) y Lozano et al. (2013) no informaron diferencias significativas entre las direcciones de muestreo en la distribución del tamaño de poros.

El presente trabajo final de carrera busca determinar el impacto del tránsito agrícola sobre la anisotropía de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo y su relación con el contenido de humedad.

2- HIPOTESIS

- El tránsito en húmedo genera un mayor impacto negativo sobre la conductividad hidráulica y la distribución de tamaño de poros en comparación con el tránsito en seco.
- La compactación debida al tránsito agrícola genera un cambio en la direccionalidad de las propiedades físicas e hidráulicas del suelo.
- Altos niveles de intensidad de tráfico en húmedo generan una mayor conductividad hidráulica en la dirección horizontal, en comparación con el tránsito en seco.

3- OBJETIVOS

- Determinar los efectos de distintas intensidades de tránsito en condiciones húmedas y secas del suelo sobre la conductividad hidráulica y la distribución de tamaño de poros.

- Determinar cambios en la orientación de la configuración del sistema poroso del suelo a través de la medición de la conductividad hidráulica a distintas tensiones en muestras tomadas vertical y horizontalmente.

4- MATERIALES Y METODOS

Sitio y tratamientos

El estudio se llevó adelante en la Estación Experimental Julio Hirschorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP), en un ensayo de tráfico repetido sobre la misma huella en dos condiciones de humedad distintas. El suelo es un Argiudol vértico (59,3 % limo, 23,5 % arcilla y 17.2 % arena). El ensayo considera dos niveles de intensidad de tránsito (0 y 10 pasadas sobre la misma huella de un tractor Jhon Deere 6300, Diseño FWA, potencia 67,1kW, peso total 4050kg), realizándose en dos condiciones de humedad del suelo (húmedo, 24 horas después de una lluvia; y seco, después de 6 semanas sin registrar precipitaciones significativas). Un total de 3 tratamientos (Testigo, 10 pasadas en húmedo y 10 pasadas en seco) fueron analizados.

Determinaciones

Propiedades generales del suelo

Se determinó la densidad aparente a partir del peso de muestras de suelo tomadas con cilindros de acero inoxidable de volumen conocido (385 cm^3) y secas en estufa a 105°C hasta peso constante (Hillel, 1998). Adicionalmente, se determinó el carbono orgánico total mediante el método de Walkley y Black (1934) del horizonte superficial del suelo.

Ensayos de infiltración a campo

Se utilizó el infiltrómetro de disco a tensión (TI) (Perroux y White, 1988), con un diámetro de disco de 12,5 cm, para determinar la tasa de infiltración básica.

Los ensayos de infiltración se realizaron todos en el mismo momento. Se realizaron 4 repeticiones en cada tratamiento eligiendo distintos sitios al azar dentro de cada huella visible de maquinaria. Los residuos del cultivo fueron removidos de la superficie. Se esparció una fina capa de arena seca, para

asegurar un buen contacto hidráulico. Se midió infiltración a tres tensiones de entrega de agua, h (6, 3 y 0 cm, aplicadas en dicho orden). El uso de diferentes tensiones permitió distinguir el aporte de poros de diferentes tamaños al proceso de infiltración. Se registró el flujo hasta alcanzar el estado estacionario. La infiltración acumulada se registró cada 5 min hasta los 10 min, cada 10 min hasta el fin del ensayo para cada tensión. Cuando la tasa de infiltración no cambió en cuatro mediciones tomadas a 10 min, se asumió flujo estacionario, y la tasa de infiltración básica para cada tensión se calculó en base a estas últimas cuatro mediciones.

La conductividad hidráulica, K , a diferentes tensiones (K_0 , K_3 , y K_6), fueron calculadas en base a la tasa de infiltración básica usando el método de las cargas múltiples de Ankeny (Ankeny et al., 1991). A partir de los valores de K (h) obtenidos, se determinó la porosidad efectiva (ϵ). 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 grande efectiva (ϵ_{ma}) como aquellos poros que drenan a h mayores que -3 cm ($r > 0,5$ mm), y mesoporosidad grande efectiva (ϵ_{me}) a los que drenaron a h entre -3 y -6 cm ($0,5$ mm $> r > 0,25$ mm) (Lozano, 2014).

Curva de retención hídrica y distribución de tamaño de poros

Se extrajeron muestras indisturbadas de suelo en cilindros de acero inoxidable de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura) en dos direcciones (vertical y horizontal). Se determinó la curva de retención hídrica (CRH) y la distribución de tamaño de poros. 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 40 m en olla de Richard). Cada tensión (h) se relacionó con una familia de poros según la ecuación de ascenso capilar (ecuación 1.25) (Hillel, 1998) y se obtuvieron los valores medios de macroporosidad (θ_{ma} , [$m^3 m^{-3}$], radio $> 30 \mu m$); mesoporosidad (θ_{me} , [$m^3 m^{-3}$], $15 \mu m < \text{radio} < 30 \mu m$) y microporosidad (θ_{mi} , [$m^3 m^{-3}$], radio $< 15 \mu m$), derivados de la CRH.

Mini infiltración en laboratorio

Luego de la determinación de la curva de retención hídrica, a las mismas muestras se las sometió a ensayos de mini-infiltración (MI) en laboratorio. El dispositivo utilizado consistió en un tubo con un pequeño disco (con una membrana del mismo material que la base del TI) de 1 cm de radio conectado a un reservorio de agua (Fig 2.). El depósito de agua se colocó en una balanza analítica (± 0.001 g), conectado a una computadora. Las burbujas de aire fueron eliminadas previamente del mini infiltrómetro. Cada muestra de suelo se colocó en contacto con el disco de tensión. 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 demoró 3 minutos en alcanzar el estado estacionario y la masa de agua que infiltró por capilaridad quedó registrada en la balanza (como la variación de la masa) segundo a segundo. 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 K_{0MI} , K_{3MI} y K_{6MI} utilizando el método de Ankeny et al. (1991) de cargas múltiples descrito anteriormente.

Análisis de datos

Para determinar la influencia de los distintas intensidades de tránsito y el contenido de humedad del suelo sobre las propiedades estudiadas y su direccionalidad se realizó un ANOVA de dos factores (tratamiento y dirección de muestreo) (Sokal & Rohlf, 1995). Se realizó un test de medias LSD Fischer para comparar las medias. Los análisis se realizaron con un nivel de significancia de $p = 0.05$. Aquellas variables que presentaron distribución log normal se transformaron para su análisis.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conductividad hidráulica y porosidad efectiva.

Se observó en lo referido a la conductividad hidráulica obtenida a partir de ensayos de infiltración a campo, que K_0 y K_3 no presentaron diferencias

significativas ($p > 0,05$) (Tabla 1). Por otro lado, K_6 mostró un incremento en el tratamiento 10S en comparación con el tratamiento 10H (Tabla 1). En cuanto a los valores observados de ϵ_{ma} y ϵ_{me} , no se observaron diferencias significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos estudiados para ambas variables (Tabla 1). Esto está en desacuerdo con varios reportes, que mencionan que el tráfico de maquinaria reduce la conductividad hidráulica del suelo (Green et al., 2003; Lipiec y Hatano, 2003, Zhang et al., 2006), especialmente a altos contenidos de humedad (Obour y Ugarte, 2021). Por otro lado, se ha informado que la compactación del suelo podría aumentar la ocurrencia de flujo preferencial, debido a la formación de macroporos producidos por la reestructuración del sistema de poros (Beck-Broichsitter et al., 2022), pudiendo esto ser una de las causas de un aumento de K_6 en el tratamiento 10S.

Tabla 1. Valores de conductividad hidráulica a distintas presiones de entrega de agua (K_0 , K_3 y K_6), macro y mesoporosidad efectiva (ϵ_{ma} y ϵ_{me}) respectivamente para cada uno de los tratamientos estudiados: 0 pasadas (0), 10 pasadas en seco (10S) y 10 pasadas en húmedo (10H).

Tratamiento	K_0	K_3	K_6	ϵ_{ma}	ϵ_{me}
	cm h ⁻¹			m ³ m ⁻³	
0	2,44 a	0,74 a	0,22 ab	1,55E ⁻⁰⁵ a	1,9E ⁻⁰⁵ a
10S	3,54 a	0,85 a	0,32 b	2,45E ⁻⁰⁵ a	1,9E ⁻⁰⁵ a
10H	5,48 a	0,97 a	0,21 a	4,09E ⁻⁰⁵ a	2,8E ⁻⁰⁵ a

Letras distintas indican valores significativamente diferentes (LSD de Fisher, $p < 0,05$).

Distribución de tamaño de poros y densidad aparente.

En la Tabla 2 se muestra la distribución de tamaño de poros, obtenida a partir de la CRH, pudiéndose observar distintos comportamientos entre los tratamientos, según la dirección de muestreo y tratamiento ($p < 0,05$ tratamiento x dirección de muestreo) (Tabla 2). Los valores de macroporosidad no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, excepto para el tratamiento 10H, el

cual mostró menores valores de macroporosidad en la dirección vertical en comparación con los tratamientos 0 y 10S para la misma dirección (Tabla 2). Por otro lado, el tratamiento 10S mostró mayores valores de mesoporos, mientras que el tratamiento 10H presentó mayores valores de microporosidad en comparación con los otros tratamientos (Tabla 2).

En cuanto a la dirección de muestreo, no se observaron diferencias significativas para ninguna de las familias de poros estudiada entre los valores verticales y horizontales, excepto en el tratamiento 10H, el cual presentó mayores valores de macroporosidad en el sentido horizontal en comparación con el sentido vertical y mayores valores de microporosidad en el sentido vertical en comparación con el sentido horizontal (Tabla 2).

No se observaron diferencias significativas entre tratamientos con tráfico para la DAP, visualizándose el menor valor en el tratamiento T0 y el máximo en el tratamiento 10H (Tabla 2). Pese a ello, los tratamientos con tráfico mostraron aumentos en dicho parámetro con respecto al testigo. Esto está de acuerdo con varios informes que mencionan que múltiples pasadas de tractor rompen los agregados del suelo, lo que provoca aumentos en la DAP (Tolon-Becerra et al., 2011; Pulido-Moncada et al., 2021) así como (García Rodríguez et al., 2020) quién menciona que la compactación del suelo es causada por la alta intensidad del tráfico y la presión de los neumáticos sobre el suelo, especialmente cuando estas operaciones se llevan a cabo en suelo húmedo. Por otro lado, los resultados aquí encontrados están de acuerdo con algunos estudios que reportaron que la estructura del suelo podría verse parcialmente alterada, cambiando la configuración de los poros del suelo sin un cambio significativo en la DAP (Berisso et al., 2013; ten Damme et al., 2021). A su vez, diversos autores mencionan que la DAP por tratarse de un indicador estático podría no ser suficientemente sensible a la hora de evaluar la calidad física del suelo en relación a los efectos del manejo que se haga del mismo (Soracco et al., 2015; Calonego et al., 2017).

Tabla 2. Valores promedio de macro (θ_{ma}), meso (θ_{me}) y microporos (θ_{mi}) y de densidad aparente para cada uno de los tratamientos (0 pasadas, 0P; 10 pasadas en húmedo, 10H; y 10 pasadas en seco, 10S) y dirección de muestreo (vertical y horizontal).

Tratamiento	Dirección	θ_{ma}	θ_{me}	θ_{mi}	DAP
		m^3m^{-3}			$g\ cm^{-3}$
0P	Vertical	0,10 ac	0,02 a	0,48 de	1,06 a
	Horizontal	0,07 ab	0,02 a	0,51 e	
10S	Vertical	0,11 ac	0,03 b	0,41 ab	1,18 ab
	Horizontal	0,09 ab	0,03 b	0,43 bc	
10H	Vertical	0,05 b	0,02 a	0,46 cd	1,24 b
	Horizontal	0,13 c	0,02 a	0,37 a	

Letras distintas indican valores significativamente diferentes (LSD de Fisher, $p < 0,05$).

En relación a la porosidad total, y siguiendo la tendencia de la densidad aparente se observó una relación inversa entre el contenido hídrico del suelo y la porosidad total. Haciendo una comparación entre los tratamientos con pasadas en húmedo y seco, el primero presentó mayor pérdida de espacios porosos debido a la compactación del suelo producto del tránsito en esas condiciones. A su vez, esta pérdida tuvo mayor impacto en sentido vertical que horizontal, observándose una marcada disminución de la macroporosidad, responsable del movimiento del aire y del agua del suelo. Tal como señala Wild (1992), la compactación y consolidación del suelo, acompañada por la pérdida de los poros más grandes, es

el resultado de la deformación y rotura bajo carga de los agregados y poros del suelo, que conduce a una pérdida de permeabilidad para el agua y las raíces.

Mini-infiltración

En la Figura 1 se muestran los valores de K a distintas presiones de entrega de agua para los distintos tratamientos, observándose distintos comportamientos, según la dirección de muestreo ($p < 0,05$ tratamiento x dirección de muestreo). Los valores de K_0 , K_3 y K_6 no mostraron diferencias significativas entre dirección de muestreo en el tratamiento testigo sin tránsito (Figura 1-a). Por el contrario, los tratamientos con tránsito mostraron valores distintos de K, según la dirección de muestreo. En el tratamiento 10S, se observaron mayores valores de K_0 y K_3 en el sentido vertical, en tanto en K_6 se evidenció mayores valores en sentido horizontal (Figura 2-b). Por otra parte, el tratamiento 10H mostró mayores valores de K_0 , K_3 y K_6 en el sentido horizontal (Figura 1-c).

Esto está de acuerdo con lo observado por diversos autores (Lozano et al., 2013; Wilson et al., 2020) quienes reportaron una mayor conectividad horizontal de la porosidad, asociada al desarrollo de estructura laminar relacionada a procesos de compactación producto de secuencias de cultivo simplificadas. En este sentido, se ha reportado mayor K_0 en dirección horizontal que en dirección vertical, principalmente para suelos estratificados, suelos compactados (Dörner y Horn, 2009) o por la presencia de agregados laminares orientados horizontalmente (Lozano et al., 2013; Soracco et al., 2010).

En concordancia con los resultados obtenidos en la determinación de la curva de retención hídrica, se visualiza el efecto que el tránsito agrícola provoca sobre la configuración y conectividad del sistema poroso del suelo en función de su contenido hídrico, produciendo aumentos en los valores de conductividad hidráulica en el sentido horizontal en condiciones húmedas.

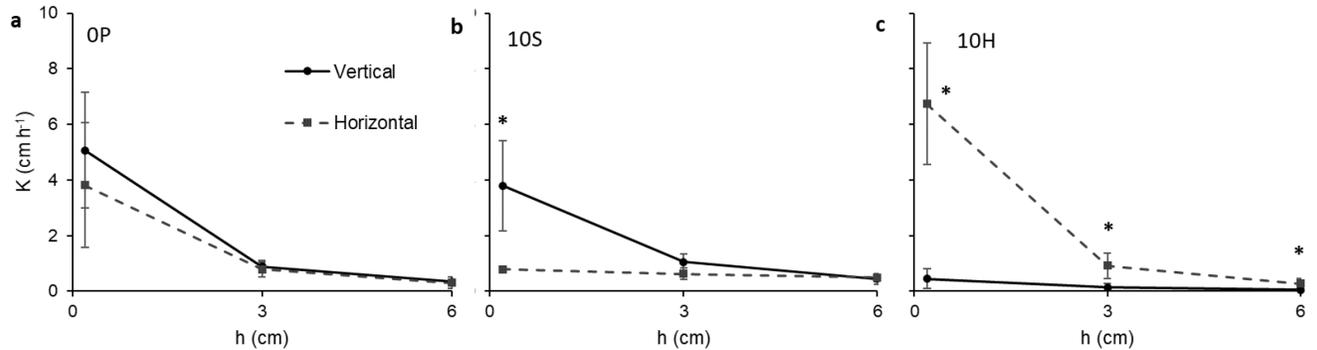


Figura 1. Valores promedio de conductividad hidráulica (K) a distintas tensiones de entrega de agua (h, 0, 3 y 6 cm) para cada uno de los tratamientos (0 pasadas, OP; 10 pasadas en húmedo, 10H; y 10 pasadas en seco, 10S) y dirección de muestreo (vertical y horizontal). * denota diferencias significativas entre direcciones de muestreo.

6. CONCLUSIONES

El tráfico agrícola reiterado provoca una modificación en la dirección de las propiedades hidráulicas del suelo, dependiendo ésta de la condición de humedad del mismo. El tráfico de maquinaria en condiciones húmedas genera una modificación en la configuración del sistema de poros dando como resultado una orientación en el sentido horizontal, con mayor conectividad en esta dirección, disminuyendo la conductividad hidráulica vertical en comparación con el tráfico de maquinaria en condiciones de baja humedad del suelo.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, creemos que es necesario incorporar estas consideraciones a la hora de realizar un manejo sostenible del recurso suelo en lo relacionado a las labores con maquinaria agrícola a fin de preservar sus propiedades físicas y evitar futuras degradaciones que supongan una alteración de su normal funcionamiento, factor fundamental en todo proceso productivo.

BIBLIOGRAFIA

Ashburner, J. E., & Sims, B. G. (1984). Elements of tractor and cultivation implement design. *Elements of tractor and cultivation implement design*

Bear, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media, Elsevier. ed. New York.

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

Berisso F. E., P. Schjønning, T. Keller, M. Lamandé, A. Simojoki, B. V. Iversen, L. Alakukku, and J. Forkman. 2013. Gas transport and subsoil pore characteristics: Anisotropy and long-term effects of compaction. *Geoderma* 195–196:184–191

Calonego, J.C., Raphael, J.P.A., Rigon, J.P.G., Oliveira Neto, L. de, Rosolem, C.A., 2017. Soil compaction management and soybean yields with cover crops under no-till and occasional chiseling. *Eur. J. Agron.* 85, 31–37. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.02.001>

Dörner, J. & Horn, R., 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in N Germany. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 169, 213–220.

Dörner, J. & Horn, R., 2009. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage. *Soil Tillage Res.* 102, 225–232.

García Rodríguez, E., Gutiérrez-Rodríguez, F., Ramírez Dávila, J. F., González-Huerta, A., Pérez López, D. D. J., & Serrato Cuevas, R. (2020). Evaluación de la intensidad del tráfico de tractores e implementos en un suelo agrícola. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 11(4), 753-766.

Horn, R. 1988. Compressibility of arable land. In: Impact of water and external forces on soil structure, Drescher, Horn and De Boodt. *Catena supplement* 11. Hannover Germany. pp 53-71.

Horn, R., & Lebert, M. (1994). Soil compactability and compressibility. In *Developments in agricultural engineering* (Vol. 11, pp. 45-69). Elsevier.

Jing, Y.-S., Zhang, B., Thimm, A. & Zepp, H., 2008. Anisotropy of Soil Hydraulic Properties Along Arable Slopes. *Pedosphere* 18, 353–362.

Jobbagy, E., S. Aguiar, G. Piñeiro & L. Garibaldi. 2021. Impronta ambiental de la agricultura de granos en Argentina: Revisando desafíos propios y ajenos. *Ciencia Hoy*. 29 (173), 55-64.

Kleijn, D., R. Bommarco, T.P.M. Fijen, L.A. Garibaldi & S.G. Potts. 2019. Ecological Intensification: Bridging the Gap between Science and Practice. *Trends Ecol. Evol.* 34(2), 154–166.

Lamandé, M., Schjønning, P., Dal Ferro, N. & Morari, F. 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.* 72(2), 769-781.

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 Sci.* 178, 612–617.

Olson, K.R., M. Al-Kaisi, R. Lal & L.W. Morton. 2017. Soil ecosystem services and intensified cropping systems. *J. Soil Water Conserv.* 72(3), 64A-69A.

Peng, X. & Horn, R., 2008. Time-dependent, anisotropic pore structure and soil strength in a-10-year period after intensive tractor wheeling under conservation and conventional tillage. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171, 936–944.

Pulido-Moncada, M., Labouriau, R., Kesser, M., Zanini, P.P.G., Guimarães, R.M.L., Munkholm, L.J., 2021. Anisotropy of subsoil pore characteristics and hydraulic conductivity as affected by compaction and cover crop treatments. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 85, 28–39. <https://doi.org/10.1002/saj2.20134>

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.

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 Tillage Res. 109, 18–22. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.03.013>

Soracco, C.G., Lozano, L.A., Villarreal, R., Palancar, T.C., Collazo, D.J., Sarli, G.O. & Figueira, R.R., 2015. Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. *Rev. Bras. Cienc. do Solo* 39, 408–415. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140359>

Soracco, C.G., Villarreal, R., Melani, E.M., Oderiz, J.A., Salazar, M.P., Otero, M.F., Irizar, A. & Lozano, L.A. 2019. Hydraulic conductivity and pore connectivity. Effects of conventional and no-till systems determined using a simple laboratory device. *Geoderma* 337, 1236-1244.

ten Damme, L., Schjøning, P., J. Munkholm, L., Green, O., K. Nielsen, S., Lamandé, M., 2021. Soil structure response to field traffic: Effects of traction and repeated wheeling. *Soil Tillage Res.* 213. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105128>

Tilman, D., Balzer, C. & Hill, J., Befort, B. L. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the national academy of sciences*, 108(50), 20260-20264.

Tolon-Becerra, A., Lastra-Bravo, X.B., Botta, G.F., Tourn, M., Linares, P., Ressia, M., Balbuena, R., 2011. Traffic effect on soil compaction and yields of wheat in Spain. *Span. J. Agric. Res.* 9, 395–403. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110902-235-10>.

Wild, A. 1992. *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Ediciones Mundi-Prensa. 1025 p.