

## TRÁNSITO REPETIDO SOBRE LA MISMA HUELLA: EFECTO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE UN ARGUJOL TÍPICO

Guido Bellora<sup>1</sup>, Luis Alberto Lozano<sup>2</sup>, C. Germán Soracco<sup>2</sup>, Facundo Guilino<sup>1</sup>, Nicolas Polich<sup>1,2\*</sup>, María Paz Salazar<sup>2</sup>, Rafael Villarreal<sup>2</sup>, Telmo Palancar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de La Plata. Argentina

<sup>2</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

### RESUMEN

Con el aumento de la masa de las máquinas y el tránsito repetido se han ido incrementando los problemas de compactación. Además, frecuentemente se transitan los lotes en condiciones de baja capacidad portante generando una compactación superficial del suelo importante (huelleado). Se realizó un ensayo para determinar la influencia del número de pasadas y de la humedad del suelo en el momento del tránsito sobre la compactación del suelo. Se realizaron 1, 3 y 10 pasadas de un tractor con el suelo a dos contenidos de humedad (34 % = húmedo y 24 % = parcialmente seco (PS)). Se midieron la profundidad de huella, la humedad gravimétrica, la resistencia a la penetración y la producción de materia seca del pastizal natural como variables respuesta en dos instancias: inicial (24 h después de una precipitación) y final (luego de las PS). Adicionalmente, en la instancia final se determinó la conductividad hidráulica a distintas tensiones, distribución de tamaño de poros y densidad aparente (DAP). El mayor huelleado se produjo con el tránsito en húmedo y con el incremento del número de pasadas. En los tratamientos con tránsito se alcanzaron valores de resistencia a la penetración que limitan o detienen el crecimiento radical y en consecuencia comprometen el rendimiento del cultivo. Se observó un aumento de la DAP y una disminución de la macroporosidad ante el tránsito repetido especialmente en condiciones secas ( $P < 0,05$ ). El tratamiento de mayor número de pasadas en PS fue el que tuvo menor rendimiento de materia seca.

**Palabras clave:** compactación de suelos, resistencia a la penetración, materia seca, infiltración.

## REPEATED TRAFFIC OVER THE SAME TRACK: EFFECT ON THE PHYSICAL PROPERTIES OF A TYPIC ARGUJOLL

### ABSTRACT

With the increase in machinery mass and repeated traffic, compaction problems have arisen. In addition, plots are frequently trafficked in conditions of low bearing capacity, generating a significant compaction of the superficial soil (tracks). A trial was carried out to determine the influence of the number of passes and soil moisture during transit on soil compaction. Tractor passes (1, 3 and 10) were done with the soil at two moisture contents (34% = wet and 24% = partially dry). Track depth, gravimetric moisture content, penetration resistance, and dry matter production were measured on a natural grassland at two moments: initial (24 h after a rainfall event) and final (when the soil PS). Additionally, hydraulic conductivity at different water pressure heads, pore size distribution and bulk density (DAP) were determined at the final measure. The greatest track depth occurred with wet traffic and with the increase in the number of passes. In the treatments with traffic, values of penetration resistance that limit or stop root growth and consequently compromise crop yield were reached. The treatment with the highest number of partially dry passes had

\* Autor de contacto:  
polichnicolas@gmail.com

Recibido:  
26-08-22

Recibido con revisiones:  
02-06-23

Aceptado:  
05-06-23

the lowest dry matter yield. An increase in DAP and a decrease in macroporosity were observed as a result of repeated traffic, especially in dry conditions ( $P < 0.05$ ). The treatment with the highest number of passes in PS was the one with the lowest yield of dry matter.

**Keywords:** soil compaction, penetration resistance, dry matter yield, infiltration.

## INTRODUCCIÓN

En la República Argentina la mayor parte de la superficie cultivada se trabaja bajo el sistema de Siembra Directa (SD) ocupando el 91 % de la superficie total agrícola (Nocelli, 2017). La adopción masiva de sistemas de SD disminuyó la intensidad del tránsito agrícola en cuanto al número de pasadas, pero no en cuanto a la relación masa/eje que el suelo deformable debe soportar. Este problema es cada vez más pronunciado debido al aumento del ancho de labor de los implementos para obtener una mayor capacidad de trabajo, y consecuentemente el aumento de peso tanto de implementos como de tractores para lograr la eficiencia tractiva global óptima (Botta et al., 2009; Rivero et al., 2022). En la región pampeana la ausencia de remoción, la presencia de maquinaria agrícola de mayor peso y el tránsito en húmedo generaron un aumento en la compactación superficial y subsuperficial del suelo. Según Martiren et al. (2016) solo en Europa 33.000.000 ha de suelo arable se encuentra altamente degradado por el reiterado pasaje de tractores agrícolas.

La problemática de compactación es detectada mediante mermas en el rendimiento, menor exploración de raíces, mayor densidad aparente y menor infiltración por lo cual debe ser monitoreada a través de varios parámetros indicadores de la modificación de las condiciones mecánicas, físicas y químicas del suelo afectado (Hamza & Anderson, 2005). Según Botta et al. (2009) y Raper (2005) la superficie del suelo es la capa más vulnerable tanto a la compresión como al desplazamiento ante el paso de la maquinaria agrícola. Para caracterizar el efecto del tránsito sobre la matriz del suelo está extensamente difundida la utilización de las variables resistencia a la penetración y densidad aparente (DAP) (Alakukku, 1997). La resistencia a la penetración se correlaciona positivamente con la DAP y por eso será alta en pisos de arado, suelos sin labranza y suelos altamente transitados (Hernández-Ramírez et al., 2014; Keller et al., 2017; Martínez et al., 2016). Las propiedades indicadoras de retención de agua en el suelo, tamaño y distribución de los poros y resistencia a la penetración son variables más sensibles para evidenciar la compactación que la DAP (Alakukku, 1996). Se ha reportado que el fenómeno de compactación no solo genera una disminución del volumen de poros del suelo, sino que también afecta la orientación y la tortuosidad del sistema poroso (Soracco et al., 2015). Estos cambios resultan en una modificación de las propiedades hidráulicas y del flujo de agua en el suelo. Varios autores encontraron una disminución de la conductividad hidráulica en suelos compactados, debido a una disminución de los poros conductores de agua (Horton et al., 1994; Soracco et al., 2015). Por el contrario, Zhang et al. (2006) no observaron diferencias en la conductividad hidráulica saturada ( $K_p$ ) entre suelos compactados y sin compactar. Por otro lado, la dureza del suelo se usa como medida de la compactación porque refleja su resistencia a la penetración de raíces (Hamza y Anderson, 2005). Respecto a valores limitantes, Threadgill (1982) indicó que valores de 1500 kPa de resistencia a la penetración disminuyen el crecimiento de raíces y valores de 2000 kPa lo detienen. Según Kirkegaard (1990) el efecto de la dureza del suelo en la raíz daña el crecimiento de ésta en la mayoría de las especies y reduce el crecimiento 50%, cuando el índice de cono se encuentra entre 700 y 1500 kPa, y lo limita completamente a valores mayores de 4000 kPa. Narro-Farias (1994) encontró que valores mayores a 1000 kPa en suelos finos pueden reducir el crecimiento radical. Además, Colombi et al. (2018) encontraron que una alta compactación superficial provoca un desarrollo superficial de raíces que absorben el agua del perfil aumentando su impedancia mecánica y dificultando la exploración de los estratos inferiores. Existen antecedentes sobre reducción en el rendimiento por causa de la compactación (Marinello et al., 2017; Tolon-Becerra et al., 2011). Mur y Balbuena (2014) compararon el efecto de diferentes números de pasadas de tractor sobre la misma huella, y detectaron que el tratamiento con mayor número de pasadas (5 pasadas) redujo el rendimiento respecto al testigo en un 12%, no hallando diferencias en el tratamiento intermedio de tres pasadas.

Los valores de resistencia mecánica varían considerablemente, 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 del suelo (Ashburner y Sims, 1984). Con la pérdida de humedad, se incrementa la resistencia del suelo (Håkansson & Lipiec, 2000). Con altos contenidos de agua, el suelo usualmente se deforma fácilmente, puede darse poca compactación a menos que haya tiempo y oportunidad para que el agua escape. Con suelos húmedos, bajo las cargas transitorias producidas por el tránsito y algunos aperos de labranza, puede haber encharcamiento, deformación, pérdidas de agregados y quizás algo de dispersión, pero poca pérdida de volumen de suelo. 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). De acuerdo con Ellies et al. (2000) mientras en los suelos de textura gruesa hay una propagación de tensiones principalmente vertical en los suelos de textura fina es multidireccional.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la incidencia del tránsito repetido sobre la misma huella con distintos niveles de humedad en la compactación de un Argiudol típico a través de la medición de distintas variables físicas y la producción de materia seca del pastizal.

La hipótesis planteada para este trabajo es que el tránsito repetido sobre la misma huella producirá modificaciones en las propiedades físicas y la producción de materia seca en pastizales, siendo diferente el impacto según el contenido de humedad al momento del tránsito.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la Estación Experimental Julio Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales (UNLP) se efectuó un ensayo de tránsito repetido sobre la misma huella sobre un suelo Argiudol típico, secuencia de horizontes: A (0–0.29 m), AB (0.29–0.37 m), Bt (0.37–1.15 m), BC (1.15–1.60 m) and Ck (1.60–2.00 m) (Soil Survey Staff, 2014) (serie Centeno) (Hurtado et al., 2006). El contenido de humedad a capacidad de campo (0,3 atm) y punto de marchitez permanente (15 atm) fue de  $0,39 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$  y  $0,21 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ , respectivamente. El clima de la zona es templado húmedo, con una temperatura media anual de  $16,4 \text{ }^\circ\text{C}$  y precipitaciones medias de 1083 mm.

Se efectuaron 1, 3 y 10 pasadas sobre la misma huella a dos contenidos de humedad con un tractor John Deere 6300 (diseño FWA, potencia 67,1 kW, peso total 4050 kg), 24 horas después de una lluvia (tránsito en húmedo, 34,5% de humedad en promedio en los 10 cm superficiales) y el mismo número de pasadas sobre la misma huella en otro sector del lote (1, 3 y 10 pasadas) después de 6 semanas sin registrar precipitaciones significativas (tránsito en PS, 24,4% de humedad en promedio en los 10 cm superficiales) totalizando 7 tratamientos (Testigo, 1, 3 y 10 pasadas en húmedo, y 1, 3 y 10 pasadas en PS). En los tratamientos de tránsito se determinó la profundidad de huella (cm) una vez realizadas todas las pasadas, y en todos los tratamientos se determinó la humedad gravimétrica y la resistencia a la penetración en dos instancias de medición, la inicial en noviembre de 2020 (luego de efectuar las pasadas en PS) y la final en marzo de 2021. En la instancia final se determinó adicionalmente la producción de materia seca del pastizal natural existente en el lugar y se realizaron ensayos de infiltración y extracción de muestras no disturbadas para la determinación de la conductividad hidráulica (K) a distintas tensiones (h) y la distribución de tamaño de poros. Para determinar la resistencia a la penetración se usó un penetrómetro de cono electrónico SC900 Soil Compaction Meter Fieldscout, construido bajo Norma ASAE S.313, con principio de medición de profundidad por ultrasonido. Los datos de penetrometría fueron analizados en referencia a la humedad gravimétrica del suelo y se tomaron hasta los 45 cm de profundidad, en diferentes zonas de la huella.

Para la determinación de la K a distintas tensiones, se realizaron ensayos de infiltración in situ. Se utilizó un infiltrómetro de disco a tensión (Perroux & White, 1988), con un diámetro de disco de 12,5 cm, realizándose 4 repeticiones por cada tratamiento. Se aplicaron distintas tensiones de entrega de agua (6, 3 y 0 cm, aplicadas en ese orden), a partir de las cuales se obtuvieron las tasas de infiltración básica a cada tensión. Se utilizó el método de cargas múltiples (Ankeny et al., 1991) para la obtención de la K a dichas tensiones, llamadas  $K_0$ ,  $K_3$  y  $K_6$ . Adicionalmente se calculó la porosidad efectiva según el método de Watson and Lu-xmoore (1986). Se calculó el índice de conectividad de la porosidad total ( $C_w$ ) según Lozano et al. (2013).

De cada tratamiento se extrajeron 5 muestras no disturbadas (cilindros de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura, volumen  $98 \text{ cm}^3$ ) de los primeros 5 cm del suelo. Estas muestras fueron saturadas con agua desde abajo durante 48 h. Las muestras de suelo fueron sometidas a distintas tensiones (0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m y 1 m) usando una mesa de arena para la determinación de la curva de retención hídrica (CRH). Los datos de retención hídrica obtenidos en cada muestra fueron ajustados al modelo de van Genuchten (1980) usando el código RETC (van Genuchten et al., 1991). A partir de los datos ajustados, se determinó la distribución de tamaño de poros, a través de la derivada primera de la CRH y se obtuvieron los valores medios de macroporosidad ( $\theta_{ma}$ , diámetro > 60  $\mu\text{m}$ ); mesoporosidad ( $\theta_{me}$ , 30  $\mu\text{m}$  < diámetro < 60  $\mu\text{m}$ ) y microporosidad ( $\theta_{mi}$ , diámetro < 30  $\mu\text{m}$ ).

Además, se determinó la DAP a partir del peso de muestras de suelo tomadas con cilindros de acero inoxi-

dable (10 cm de alto, 7,5 cm de diámetro) de volumen conocido (442 cm<sup>3</sup>) y secas en estufa a 105°C hasta peso constante (Hillel, 1998).

Para determinar la materia seca del pastizal natural se usaron tres sectores de 0,25 m<sup>2</sup> de superficie en cada tratamiento. En los tratamientos con tránsito la muestra se tomó sobre las huellas del tractor. Para el análisis estadístico se realizó un ANOVA factorial para determinar si las propiedades del suelo estudiadas fueron influenciadas por el número de pasadas (cuatro niveles: 0, 1, 3 y 10 pasadas) y la condición del suelo (dos niveles: húmedo o PS) como factores fijos (Sokal & Rohlf, 1995). La comparación de medias se realizó mediante un test de Fisher (LSD) (Sokal & Rohlf, 1995). El software utilizado fue STATISTICA (Statsoft, 2004), con un nivel de significancia del 5%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Profundidad de huella

El hundimiento vertical producido por el tránsito fue proporcional al número de pasadas (Tabla 1). En los dos tratamientos de mayor tránsito (10 pasadas), la huella en húmedo casi duplica a la profundidad del tratamiento en PS (9,4 cm vs 5,3 cm). Si el tratamiento de mayor tránsito representa el 100% de la deformación producida, en el tratamiento en húmedo en la primera pasada se produciría el 39% de la deformación total (3,7 cm/9,4 cm) y en las primeras tres pasadas el 62% del total, mientras que en el tratamiento PS con la primera pasada se llegaría al 68% del total y con las primeras tres pasadas al 89% del total, por lo que cuanto más húmedo se encuentra el suelo admite mayor deformación y el incremento de la deformación no se detiene con las primeras pasadas, si no que se va pronunciando de manera marcada con las sucesivas pasadas.

**Tabla 1:** Profundidad de huella para los distintos tratamientos (PS = suelo parcialmente seco).

**Table 1:** Track depth for different treatments (PS = partially dry soil).

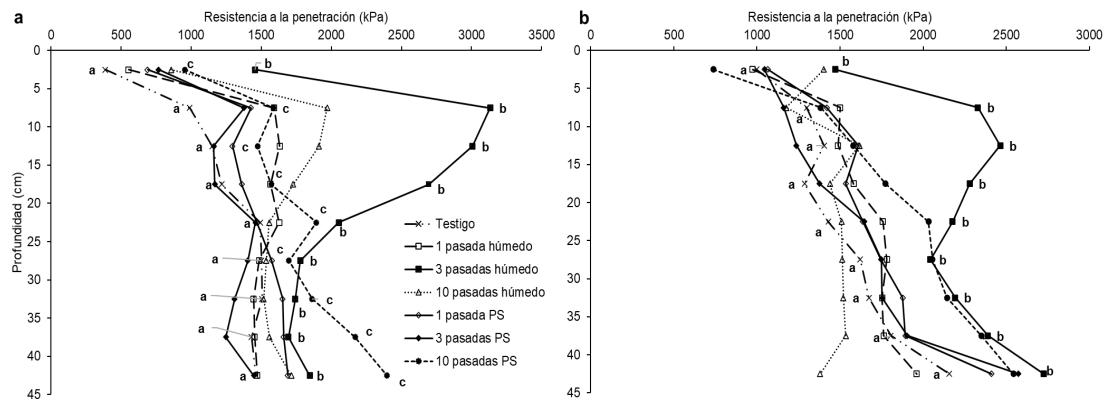
Tratamiento	Profundidad de huella (cm)
1 pasada en húmedo	3,7a
3 pasadas en húmedo	5,8c
10 pasadas en húmedo	9,4d
1 pasada PS	3,6a
3 pasadas PS	4,7b
10 pasadas PS	5,3bc

Letras iguales denotan ausencia de diferencias mínimas significativas entre tratamientos según el test de LSD ( $p < 0,05$ ).

Draghi *et al.* (2015) plantean que es notorio que el tránsito sobre suelo labrado provoca 83% del hundimiento final en la primera pasada. El tránsito posterior y hasta las diez pasadas provocó sólo 17% del hundimiento restante. En el presente ensayo se realizó el tránsito sobre suelo firme, mientras que Draghi *et al.* (2015) realizaron las determinaciones en suelos labrados y de allí provienen las diferencias encontradas en los porcentajes de deformación acumulada en las distintas pasadas.

### Penetrometría

En el momento inicial no hubo diferencias significativas entre tratamientos en el contenido gravimétrico de humedad, con valores promedios de 24,5 % para la capa de 0-10 cm, 24,5 % para la capa de 10-20 cm y de 26,1 % para la capa de 20-30 cm. La ausencia de diferencias significativas en el contenido de humedad entre los tratamientos al momento de medir la resistencia a la penetración permite descartar que las diferencias en esta variable en esta fecha puedan ser adjudicadas a diferencias de humedad de los suelos (Ashburner y Sims, 1984; Håkansson & Lipiec, 2000).



**Figura 1:** Resistencia a la penetración (kPa) inicial (a) y final (b) en los distintos tratamientos según la profundidad (PS = suelo parcialmente seco). Letras distintas corresponden a diferencias significativas entre tratamientos a una misma profundidad ( $P < 0,05$ ).

**Figure 1:** Initial (a) and final (b) resistance to penetration (kPa) in the different treatments according to depth (PS = partially dry soil). Different letters indicate significant differences between treatments at the same depth ( $P < 0.05$ ).

Los tratamientos de 3 pasadas en húmedo y 10 pasadas en PS mostraron valores de resistencia a la penetración significativamente mayores al testigo en todo el perfil (Figura 1 a). En los tratamientos de tránsito en húmedo los mayores valores estuvieron en el tratamiento de 3 pasadas y los menores en el de 1 pasada, teniendo el tratamiento de 10 pasadas un valor intermedio. Si bien sería esperable que el tratamiento de 10 pasadas en húmedo presente mayor resistencia a la penetración que el de 3 pasadas en húmedo, una posible explicación es la diferencia en el contenido de humedad entre los dos tratamientos al momento de la determinación. El tratamiento de 3 pasadas en húmedo presentó un valor promedio de humedad de 21 y 22 % en las capas de 0-10 y 10-20 cm, mientras que el de 10 pasadas tenía una humedad de 26 % en estas capas, aunque las diferencias no fueron significativas debido a la alta variabilidad espacial de esta propiedad. En los tratamientos de tránsito PS los mayores valores fueron para el de 10 pasadas, los menores para 3 pasadas, teniendo 1 pasada valores intermedios. El tratamiento de mayor resistencia a la penetración fue el de 3 pasadas en húmedo hasta los 30 cm y a partir de allí lo fue el de 10 pasadas en PS (Figura 1 a). Si bien la mayor impedancia superficial se dio en uno de los tratamientos en húmedo, la transmisión de las tensiones hacia los estratos inferiores ha sido mayor en el tratamiento PS en coincidencia con lo reportado por García Rodríguez et al. (2020), Horn (1988) y Horn and Lebert (1994).

El tratamiento testigo sólo superó levemente en dos estratos (25 – 30 cm y 30 – 35 cm) el límite de 1500 kPa señalado por Threadgill (1982) como limitante del crecimiento radical, en dos estratos. Por su parte, el tratamiento de 1 pasada en PS superó este límite sólo a partir de los 25 cm, mientras que el tratamiento de 3 pasadas en el suelo PS no superó el límite en ningún estrato. El resto de los tratamientos con tránsito superaron este límite en varios estratos. Sólo se superó el límite de 2000 kPa (valor que detiene el crecimiento radical según Threadgill (1982)) en el tratamiento de 3 pasadas en húmedo entre los 5 y los 25 cm y en el tratamiento de 10 pasadas en PS en los últimos dos estratos.

Al momento final (Figura 1 b), en los primeros 20 cm solo el tratamiento de 3 pasadas en PS tuvo una humedad significativamente menor que el testigo (19,69 % y 24,51 % respectivamente) sin verificarse diferencias significativas entre los otros tratamientos. En el tercer estrato (20-30 cm) 3 pasadas en PS fue el tratamiento de menos humedad (19,81 %) y 3 pasadas en húmedo el de mayor humedad (31,54 %). Estas diferencias podrían influir en variaciones en la resistencia relevadas en estos estratos.

Los mayores valores de resistencia a la penetración que presentan diferencias significativas son los correspondientes al tratamiento de 3 pasadas en húmedo (Figura 1 b) superando en casi todo el perfil (a excepción de los primeros 5 cm) los 2000 kPa citados por Threadgill (1982) como valor que detiene el crecimiento radical. También en el tratamiento de 10 pasadas en PS se supera dicho valor, pero a partir de los 20 cm (Figura 1 b). Es difícil de explicar la mayor resistencia encontrada en el tratamiento de 3 pasadas en húmedo respecto al de 10 pasadas en húmedo (diferencias significativas desde los 5 cm), aunque este tratamiento (3 pasadas en húmedo) ya presentó valores mayores de resistencia a la penetración en la medición inicial.

El testigo presentó valores que limitan el crecimiento radical (superiores a 1500 kPa según Threadgill, (1982)) desde los 25 cm, mientras que en los tratamientos con tránsito se estos valores se observaron ya desde los 10 cm (a excepción de 3 pasadas en PS que se supera desde los 20 cm). Todos los tratamientos de tránsito (a excepción de 3 pasadas en PS), aún los de menor intensidad han generado una resistencia a la penetración que compromete el crecimiento radical en los primeros 10 cm del suelo y esto se observa 4 meses después del evento de tránsito.

No se encontró correlación entre la resistencia a la penetración promedio de los primeros 15 cm y la profundidad de huella de cada tratamiento ( $P>0,05$ ).

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

No se observaron efectos significativos del tránsito para ninguna de las variables derivadas de los ensayos de infiltración ( $P>0,05$ ) (Tabla 2). Sin embargo, existe una tendencia a la disminución en los valores de  $K_0$ ,  $\epsilon_{ma}$  y Cw para los tratamientos en tránsito respecto al testigo ( $P<0,1$ ). Esto puede deberse a que los parámetros hidráulicos basados en flujo presentan una elevada variabilidad natural (Bagarello & Sgroi, 2004). Nuestros resultados coinciden con lo reportado por Zhang et al. (2006), quienes no encontraron diferencias en la  $K_0$  entre suelos compactados y sin compactar. Por el contrario, la ausencia de diferencias para la K y los parámetros derivados contrastan con diversos reportes que mencionan una disminución de la K en suelos compactados, debido a una disminución de los poros conductores de agua (Horton et al., 1994; Soracco et al., 2015).

**Tabla 2:** Conductividad hidráulica a distintas tensiones ( $K_0$ ,  $K_3$  y  $K_6$ ), macro y mesoporosidad efectiva ( $\epsilon_{ma}$  y  $\epsilon_{me}$ ) y conectividad de poros (Cw) para los distintos tratamientos (PS = suelo parcialmente seco).

**Table 2:** Hydraulic conductivity at different tensions ( $K_0$ ,  $K_3$  and  $K_6$ ), effective macro and mesoporosity ( $\epsilon_{ma}$  and  $\epsilon_{me}$ ) and pore connectivity (Cw) for the different treatments (PS = partially dry soil).

Tratamiento	$K_0$ cm h <sup>-1</sup>	$K_3$ cm h <sup>-1</sup>	$K_6$ cm h <sup>-1</sup>	$\epsilon_{ma}$ %	$\epsilon_{me}$ %	Cw cm h <sup>-1</sup>
Testigo	3,24 a	0,64 a	0,27 a	2,35E <sup>-05</sup> a	1,36E <sup>-05</sup> a	5,11 a
1 pasada húmedo	0,90 a	0,23 a	0,09 a	6,05E <sup>-06</sup> a	5,19E <sup>-06</sup> a	1,63 a
3 pasadas húmedo	1,35 a	0,33 a	0,17 a	9,20E <sup>-06</sup> a	5,89E <sup>-06</sup> a	2,46 a
10 pasadas húmedo	1,77 a	0,39 a	0,20 a	1,25E <sup>-05</sup> a	7,03E <sup>-06</sup> a	3,28 a
1 pasada PS	1,24 a	0,52 a	0,30 a	6,49E <sup>-06</sup> a	8,20E <sup>-06</sup> a	2,15 a
3 pasadas PS	1,47 a	0,57 a	0,32 a	8,12E <sup>-06</sup> a	9,18E <sup>-06</sup> a	2,50 a
10 pasadas PS	1,31 a	0,47 a	0,26 a	7,66E <sup>-06</sup> a	7,65E <sup>-06</sup> a	2,30 a

Letras iguales en la misma columna denotan ausencia de diferencias mínimas significativas entre tratamientos según el test de LSD ( $P<0,05$ ).

#### Densidad aparente y distribución de tamaño de poros

En la Tabla 3 se muestra un aumento de la DAP en los tratamientos transitados, tanto de pasadas en suelo húmedo como en suelo PS, en comparación con el testigo. Los tratamientos de pasadas en húmedo, especialmente 3 y 10 pasadas, mostraron los mayores valores de DAP, en concordancia con los mayores valores de resistencia a la penetración en la capa de 0 a 5 cm. Estos resultados están de acuerdo con diferentes reportes que mencionan un incremento significativo de la densidad aparente debido al tránsito agrícola intenso (Botta et al., 2009; Hassan et al., 2007;). Estos resultados indican que el tránsito agrícola, particularmente en húmedo, lleva a un incremento en la densidad aparente, disminuyendo la porosidad del suelo (Soracco et al., 2015).

**Tabla 3:** Distribución de tamaño de poros (macroporosidad,  $\theta_{ma}$ , diámetro > 60  $\mu\text{m}$ ; mesoporosidad,  $\theta_{me}$ , 30  $\mu\text{m}$  < diámetro < 60  $\mu\text{m}$ ; y microporosidad,  $\theta_{mi}$ , diámetro < 30  $\mu\text{m}$ ) y densidad aparente (DAP) en los primeros 10 cm para los distintos tratamientos (PS = suelo parcialmente seco).

**Table 3:** Pore size distribution (macroporosity,  $\theta_{ma}$ , diameter > 60  $\mu\text{m}$ ; mesoporosity,  $\theta_{me}$ , 30  $\mu\text{m}$  < diameter < 60  $\mu\text{m}$ ; and microporosity,  $\theta_{mi}$ , diameter < 30  $\mu\text{m}$ ) and bulk density in the first 10 cm for the different treatments (PS = partially dry soil).

Tratamiento	$\theta_{ma}$	$\theta_{me}$	$\theta_{mi}$	DAP
	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	$\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$	$\text{Mg m}^{-3}$
Testigo	0,16 a	0,03 ab	0,45 a	0,97 d
1 pasada, húmedo	0,12 ab	0,02 bc	0,40 a	1,19 ab
3 pasadas, húmedo	0,09 b	0,02 bc	0,43 a	1,20 a
10 pasadas, húmedo	0,08 b	0,03 a	0,43 a	1,22 a
1 pasada PS	0,12 ab	0,02 bc	0,43 a	1,12 c
3 pasadas PS	0,08 b	0,02 bc	0,48 a	1,09 c
10 pasadas PS	0,11 ab	0,02 c	0,43 a	1,14 bc

Letras iguales en la misma columna denotan ausencia de diferencias mínimas significativas entre tratamientos según el test de LSD ( $p < 0,05$ ).

En cuanto a la distribución de las distintas familias de poros, hubo un efecto del tránsito solo para  $\theta_{ma}$  y  $\theta_{me}$ , observándose una disminución significativa de la  $\theta_{ma}$  en los tratamientos bajo tránsito, en comparación con el testigo, particularmente en las pasadas en húmedo. Por el contrario, la  $\theta_{me}$  mostró un comportamiento disímil entre tratamientos, observándose los mayores valores en el tratamiento 10 pasadas en húmedo. Estos resultados están de acuerdo con distintos autores que mencionan que la disminución de la porosidad debida a procesos de compactación relacionados al tránsito agrícola genera una pérdida de la macroporosidad (Bottinelli et al., 2014). Imhoff et al. (2010) mencionan que el manejo agrícola afecta principalmente a la fracción de macroporos. Adicionalmente, nuestros resultados están de acuerdo con Tarawally et al. (2004), quienes mencionan que la disminución de macroporosidad es acompañado por un aumento de la mesoporosidad.

#### Materia seca

En la Tabla 4 se puede observar que el único tratamiento que se diferenció del testigo sin tránsito fue el de mayor cantidad de pasadas en PS ( $P < 0,05$ ). La impedancia mecánica producto de un incremento en la DAP en los primeros 10 cm del suelo reduciría el crecimiento radical y éste se traduciría en una menor producción de materia seca. También Mur y Balbuena (2014) detectaron una reducción del 12% del rendimiento del tratamiento de mayor tránsito respecto al testigo. En este trabajo la reducción en el rendimiento del tratamiento 10 pasadas en PS fue del 59% respecto al testigo, mientras que los restantes tratamientos de tránsito (salvo una pasada en húmedo) lo redujeron entre el 25 y 31 %, aunque sin diferencias significativas. La reducción del rendimiento coincide con lo encontrado en los antecedentes sobre reducción en el rendimiento por causas de compactación (Marinello et al., 2017; Tolon-Becerra et al., 2011). Tolon-Becerra et al. (2011) encontraron que las reducciones en el rendimiento aumentaban con el incremento de las pasadas.

**Tabla 4:** Materia seca en los distintos tratamientos (kg ha<sup>-1</sup>) (PS = suelo parcialmente seco).

**Table 4:** Dry matter in the different treatments (kg ha<sup>-1</sup>) (PS = partially dry soil).

Tratamiento	Materia Seca (kg ha <sup>-1</sup> )
Testigo sin tránsito	2180 b
1 pasada Húmedo	2200 b
3 pasadas Húmedo	1647 ab
10 pasadas Húmedo	1447 ab
1 pasada PS	1520 ab
3 pasadas PS	1580 ab
10 pasadas PS	907 a

Letras iguales denotan ausencia de diferencias mínimas significativas entre tratamientos según el test de LSD ( $P < 0,05$ ).

### CONCLUSIONES

La profundidad de huella se incrementó con el número de pasadas y con la humedad del suelo en el momento del tránsito para el tratamiento con el mayor número de pasadas (10 pasadas en húmedo).

El tránsito, aún con bajas intensidades, genera una impedancia mecánica en el suelo con valores de resistencia a la penetración por encima de los umbrales recomendados. El tránsito repetido, especialmente en condiciones húmedas, produce un aumento de la densidad aparente en los primeros 10 cm.

El contenido hídrico y el número de pasadas son factores muy importantes a tener en cuenta al momento del tránsito de la maquinaria agrícola. El tránsito realizado sobre suelo húmedo produce un mayor aumento en la densidad aparente del suelo, en comparación con tránsito en el suelo PS.

### REFERENCIAS

- Alakukku, L. (1996). Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I Short- term effects on the properties of clay and organic soil. *Soil and Tillage Research*, 37, 211-222. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(96\)01017-3](https://doi.org/10.1016/0167-1987(96)01017-3)
- Alakukku, L. (1997). Properties of fine-textured subsoils as affected by high axle load traffic. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 47(2), 81-88. <https://doi.org/10.1080/09064719709362444>
- 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. <https://doi.org/10.2136/sssaj1991.03615995005500020028x>
- Ashburner, J. E. y Sims, B. G. (1984). *Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza* (Vol. 56). Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura.
- Bagarello, V. & Sgroi, A. (2004). Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. *Soil & Tillage Research*, 76, 13–24. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.08.008>.
- Botta, G. F., Becerra, A. T. 6 Tourn, F. B. (2009). Effect of the number of tractors passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil and Tillage Research*, 103(2), 381-386. <https://doi.org/10.1016/j.still.2008.12.002>
- Bottinelli, N., Hallaire, V., Goutal, N., Bonnaud, P. & Ranger, J. (2014). Impact of heavy traffic on soil macroporosity of two silty forest soils: Initial effect and short-term recovery. *Geoderma*, 217, 10-17. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.025>
- Colombi, T., Chagas Torres, L., Walter, A. & Keller, T. (2018). Feedbacks between soil penetration resistance, root architecture and water uptake limit water accessibility and crop growth – A vicious circle. *Science of The Total Environment* V, 626, 1026-1035. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.01.129>
- Draghi, L., Jorajuría-Collazo, D., Sarena, D., Bailleres, M., Melani, E., Castillo, J. M., Cerisola, C. y Palancar, T. (2015). Impacto del tránsito en dos sistemas de siembra. *Agrociencia Uruguay*, 19(2), 19-67. [http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci\\_arttext&pi](http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pi)



d=S230115482015000200008&lng=es&nrm=iso&tlng=es

- Ellies, A., Smith, R., Cuevas, B., Dörner, F. y Pröschle, A. (2000). Efecto de la humedad y frecuencia del tránsito sobre la distribución de tensiones de distintos suelos. *Agro Sur*, 28(2), 60–68. <https://doi.org/10.4206/agrosur.2000.v28n2-08>
- García Rodríguez, E., Gutierrez Rodríguez, F., Ramírez Dávila, J. F., González-Huerta, A., Pérez López, D. D. J. y 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. <https://doi.org/10.29312/remexca.v11i4.2133>
- Håkansson, I. & Lipiec, J. (2000). A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*, 53(2), 71-85. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(99\)00095-1](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(99)00095-1)
- Hamza, M. A. & Anderson, W. K. (2005). Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82(2), 121-145. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.08.009>
- Hassan F. U., Ahmad, M., Ahmad, N. & Kaleem Abbasi, M. (2007). Effects of subsoil compaction on yield and yield attributes of wheat in the sub-humid region of Pakistan. *Soil & Tillage Research*, 96(1-2), 361-366. <https://doi.org/10.1016/j.still.2007.06.005>
- Hernandez-Ramirez, G., Lawrence-Smith, E.J., Sinton, S.M., Tabley, F., Schwen, A., Beare, M.H. & Brown, H.E. (2014). Root Responses to Alterations in Macroporosity and Penetrability in a Silt Loam Soil. *Soil Science Society of America Journal*, 78, 1392–1403. doi:10.2136/sssaj2014.01.0005
- Hillel, D. (1998). *Introduction to soil physics*, Academic Press.
- Horn, R. (1988). Compressibility of arable land in Impact of water and external forces on soil structure. *Selected papers of the 1st Workshop on soilphysics and soilmechanics* (pp 53-71). Catena supplement 11.
- Horn, R. & Lebert, M. (1994). Soil compactability and compressibility. En: B. D. Soane y C. van Ouwerkerk (Eds.), *Developments in agricultural engineering* (pp. 45-69). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50011-8>
- Horton, R., Ankeny, M. D. & Allmaras R. R. (1994). Effects of compaction on soil hydraulic properties. En: B.D. Soane y C. van Ouwerkerk (Eds.), *Soil compaction in crop production* (pp 141-65), Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-88286-8.50015-5>
- Hurtado, M. A., Giménez, J. E., Cabral, M. G., Silva, M. M. D., Martínez, O. R., Camilión, M. C., ... Lucesoli, H. (2006). Análisis ambiental del partido de La Plata.
- Imhoff, S., Ghiberto, P. J., Grioni, A. & Gay, J. P. (2010). Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma*, 158(3-4), 268-274. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.005>
- Keller, T., Colombi, T., Ruiz, S., Manalili, M.P., Rek, J., Stadelmann, V., Wunderli, H., Breitenstein, D., Reiser, R., Oberholzer, H., Schymanski, S., Romero-Ruiz, A., Linde, N., Weisskopf, P., Walter, A. & Or, D. (2017). Long-Term Soil Structure Observatory for Monitoring Post Compaction Evolution of Soil Structure. *Vadose Zone Journal*, 16. doi:10.2136/vzj2016.11.0118
- Kirkegaard, J. A. (1990). *Effect of compaction on the growth of pigeonpea on clay soils*. Tesis Doctoral, Universidad de Queensland. <https://doi.org/10.14264/uql.2017.587>
- 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. <https://doi.org/10.1097/SS.0000000000000027>
- Marinello, F., Pezzuolo, A., Cillis, D., Chiumenti, A. & Sartori, L. (2017). Traffic effects on soil compaction and sugar beet (*Beta vulgaris* L.) taproot quality parameters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 15(1), 11. <https://doi.org/10.5424/sjar/2017151-8935>
- Martínez, I., Chervet, A., Weisskopf, P., Sturny, W.G., Etana, A., Stettler, M., Forkman, J. & Keller, T. (2016). Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment : Part I . Crop yield , soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. *Soil & Tillage Research*, 163, 141–151. doi:10.1016/j.still.2016.05.021
- Martiren, V. S., Fonterosa, R. A., Lastra-Bravo, X. B. y Botta, G. F. (2016). Compactación por el tráfico de la maquinaria agrícola: su efecto sobre el esfuerzo cortante del suelo y el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mayz* L.). *Revista Siembra*, 3, 021-036.
- Mur, M. y Balbuena, R. (2014). Compactación de un suelo argiudol típico por tráfico en un sistema de producción de forrajes. *Ciencia del Suelo*, 32 (1), 1-12.
- Narro-Farías E. (1994). *Física de suelos, con enfoque agrícola*. Editorial Trillas.
- Nocelli, P. S. (2017). *Estimación de superficie en siembra directa campaña 2016-2017*. AAPRESID. <https://www.aapresid.org.ar/>
- Perroux, K. M. & White, I. (1988). Designs for disc infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, 52, 1205-1215.
- Raper, R. L. (2005). Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, 42(3-4), 259-280. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2004.10.010>
- Rivero, D., Botta, G. F., Antille, D. L., Ezquerro-Canalejo, A., Bienvenido, F. & Ucgul, M. (2022). Tyre Configuration and Axle Load of Front-Wheel Assist and Four-Wheel Drive Tractors Effects on Soil Compaction and Rolling Resistance under No-tillage. *Agriculture*, 12(11), 1961.
- Soil Survey Staff. (2014). *Keys to soil taxonomy* (12th ed.). USDA Natural Resources Conservation Service.
- Sokal, R. R., & Rohlf, F. J. (1995). *Biometry: The principles and practices of statistics in biological research* (3rd ed.). W.H. Freeman and Company.

- Soracco, C. G., Lozano, L. A., Villarreal, R., Palancar, T. C., Collazo, D. J., Sarli, G. O. & Filgueira, R. R. (2015). Effects of compaction due to machinery traffic on soil pore configuration. *Revista Brasileira de ciência do solo*, 39, 408-415. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140359>
- Statsoft. (2004). STATISTICA (Version 7). Statsoft.
- Tarawally M. A., Medina H., Frómata M. E. & Itza C. A. (2004). Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. *Soil & Tillage Research*, 76, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.still.2003.09.003>
- Threadgill, E. D. (1982). Residual tillage effects as determined by cone index. *Transaction of the ASAE*, 25(4), 859-863. <https://doi.org/10.13031/2013.33627>
- 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. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(2), 395-403. <https://doi.org/10.5424/sjar/20110902235-10>
- van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892- 898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>
- van Genuchten, M. T., Leij F. J. & Yates S. R. (1991). The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils. Roberts Kerr Environ. Reseach Lab. <https://doi.org/10.1002/9781118616871>
- Watson, K. W. & Luxmoore, R. J. (1986). Estimating macroporosity in a forest watershed by use of a tension infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*, 50(3), 578-582. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000030007x>
- Zhang, S., Grip, H. & Lövdahl L. (2006). Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. *Soil & Tillage Research*, 90,117-25. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.08.012>