

COMPACTACIÓN DE UN SUELO ARGIUDOL TÍPICO POR TRÁFICO EN UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE FORRAJES

MATILDE MUR & ROBERTO HERNÁN BALBUENA

Recibido: 01-05-13

Recibido con revisiones: 27-02-14

Aceptado: 01-03-14

RESUMEN

Entre los diversos procesos que conducen al deterioro de la estructura del suelo, la compactación inducida por tráfico vehicular pareciera ser uno de los desafíos más importante, para una agricultura sustentable. Para un suelo dado, la distribución de la compactación en el perfil es principalmente función de la textura, la carga aplicada, la presión en el área de contacto, el contenido de humedad y la intensidad de tráfico recibida, siendo esta última particularmente alta en los sistemas de producción de forrajes. Con el objetivo de valorar el efecto del tráfico vehicular de un tractor 2WD con una carga total de 3810 kg sobre algunas propiedades físicas del suelo y la producción de forraje de una pradera, se realizó un ensayo sobre un Argiudol típico bajo labranza convencional con los siguientes tratamientos: 5 pasajes del tractor; 3 pasajes del tractor; y un tercer tratamiento (testigo) sin tráfico. Para cuantificar el efecto del tráfico, se midió: infiltración sobre la superficie del suelo; resistencia a la penetración, desde la superficie hasta los 600 mm; densidad aparente en dos profundidades, 0-100 mm y 100-200 mm; y materia seca a los 3, 7 y 12 meses posteriores al tráfico. Los valores de resistencia a la penetración fueron significativamente mayores para los tratamientos con tráfico, presentando incrementos en todas las profundidades e instancias de medición. Las mayores diferencias se evidenciaron para la primera medición en los primeros 100 mm, con un incremento de 152% para el tratamiento de 5 pasadas y de 140% para el de 3 pasadas. La resistencia a la penetración es un parámetro más sensible a los efectos del tráfico vehicular. Las mayores intensidades de tráfico provocan disminuciones en el rendimiento de materia seca de la pradera. El uso de tractores de bajo peso por eje en los sistemas de cosecha de forrajes constituye una alternativa que reduce pero no elimina los aspectos adversos del tráfico sobre la impedancia mecánica del suelo y la productividad de la pradera.

Palabras clave. Resistencia a la penetración; densidad aparente; infiltración.

TYPIC ARGIUDOLL SOIL COMPACTION BY TRAFFIC IN A FORAGE PRODUCTION SYSTEM

ABSTRACT

Among the different processes that lead to the deterioration of soil structure, compaction induced by vehicle traffic seems to be one of the most important for sustainable agriculture. For a given soil, the compaction distribution in the profile is mainly a function of the texture, the applied load, the pressure in the contact area, the moisture content and the traffic intensity, being the last particularly high in forage production systems. In order to assess the effect of 2WD tractor vehicular traffic with a total load of 3810 kg on some soil physical properties and forage crop production, an experiment was conducted on a typical Argiudoll under conventional tillage with the following treatments: 5 tractor passes, 3 tractor passes, and a control treatment with no traffic. To quantify the traffic effect, the following soil properties were measured: soil surface infiltration, penetration resistance from the surface to 600 mm, bulk density at two depths, 0-100 mm and 100-200 mm; and dry matter 3, 7 and 12 months after traffic. Penetration resistance was significantly higher for traffic treatments, showing increases for all depths and measurement instances. The greatest differences were evidenced for the first measurement in the first 100 mm, with an increase of 152% for 5 passes and 140% for the treatment of 3 passes. The penetration resistance is more sensitive to the effects of vehicle traffic. Higher traffic intensities cause decreases in dry matter yield of forage crop. The use of low axle load tractors in forage harvesting systems is an alternative that reduced but does not eliminate the adverse aspects of traffic on soil mechanical impedance and forage crop productivity.

Key words. Penetration resistance; bulk density; infiltration.

INTRODUCCIÓN

Producto de la intensificación de la producción agropecuaria y del incremento significativo en el peso total de los conjuntos tractor/apero, la degradación estructural de los suelos es considerada uno de los principales problemas de las áreas cultivadas del mundo. Entre los diversos procesos que conducen al deterioro de la estructura del suelo, la compactación inducida por tráfico de vehículos pareciera ser el desafío más importante, a largo plazo, para una agricultura sustentable (Håkansson, 1994; Jorajuría & Draghi, 1997; Botta *et al.*, 2006).

Según Chancellor (1977), el suelo se compacta cuando la proporción del volumen total de poros ocupados por el aire, en relación al volumen total del suelo, es inadecuado para permitir el máximo crecimiento de los cultivos. Para un suelo dado, la distribución de la compactación en el perfil será función de la textura, la carga aplicada, la presión ejercida por el rodado, el estado de humedad y la intensidad de tráfico recibida. Existe consenso que la presión en la zona de contacto rueda/suelo influye en la compactación superficial (Håkansson & Reeder, 1994; Jorajuría *et al.*, 1997; Alakukku *et al.*, 2003; Botta *et al.*, 2006). Sin embargo, la compactación subsuperficial, a profundidades iguales o mayores a 400 mm, está directamente influenciada por el peso sobre el eje, independientemente del área de contacto rueda/suelo (Botta *et al.*, 2002; Tolon Becerra *et al.*, 2009). Jorajuría *et al.* (1997) proponen dividir a la compactación inducida por tráfico agrícola en dos problemas diferentes; por un lado la compactación superficial, dependiente de la presión en el área de contacto rueda-suelo y por otro lado la compactación subsuperficial, la cual es función de la carga sobre el eje. Estas diferencias modifican además la magnitud del problema que ocasionan. La primera es frecuente en los sistemas con remoción del suelo o cuando el tránsito se realiza sobre sistemas de siembra directa con inadecuadas relaciones de masa y rodado. En cambio, la compactación subsuperficial suele ser acumulativa, ya que el ciclo de labores convencionales no involucra esos horizontes y al ubicarse a mayor profundidad recibe mucho más atenuados los efectos de los agentes descompactadores naturales (Taboada, 2005), siendo su solución difícil y costosa (Håkansson & Lipiec, 2000).

Håkansson *et al.* (1988) mencionan la detección de compactaciones por debajo de los 400 mm de profundidad inducidas por el tráfico con pesos de 6 Mg por eje. Por ello, Håkansson y Danfors (1981) recomendaron limitar la masa por eje a 6 Mg, mientras que Smith y Dickson (1990) concluyeron que es necesario reducir el peso total de los conjuntos tractor-apero, lo cual implica utilizar equipos más

pequeños y aumentar el número de pasadas sobre cada hectárea de terreno a trabajar. Taylor & Burt (1987) estudiaron los efectos del pasaje repetido en una misma senda sobre la compactación del suelo, indicando que el primer pasaje del tractor es el responsable del 75% de la modificación de la densidad aparente y del 90% del hundimiento total alcanzado. Sin embargo, existen antecedentes que se contraponen a lo citado anteriormente. Raghavan *et al.* (1976) determinaron que luego de 5 pasajes la resistencia a la penetración del suelo aumenta en forma lineal con el incremento del número de pasadas y el peso recibido. En este sentido, Jorajuría & Draghi (2000), concluyeron que el pasaje repetido sobre la misma senda puede reemplazar el factor peso sobre el eje, en la responsabilidad de inducir compactación subsuperficial, indicando que 10 pasadas constituye el número crítico, en el cual se pierden las ventajas de traficar con un tractor liviano, como alternativa al trabajo de uno pesado con menos pasadas (Draghi, 2005). Botta *et al.* (2008), comparando tractores con diferente masa, concluyeron que el tráfico repetido con vehículos livianos, menores a 3000 kg por eje, produce compactación subsuperficial. Botta *et al.* (2002) concluyen que, en forma independiente del peso y de la superficie de contacto rueda/suelo, el tráfico reiterado induce compactación a nivel subsuperficial.

La intensificación de la producción de forrajes conlleva la confección de heno a partir de praderas. Este proceso implica el pasaje de máquinas de corte, hilerado y empaquetado del forraje, coincidiendo a veces la pisada del tractor en una misma senda. El número de pasadas se incrementa por la extracción del forraje del lote y el número de ciclos. Sin embargo, las características de la labor permite la utilización de tractores de baja relación peso/potencia (Márquez Delgado, 2012) disminuyendo los riesgos de compactación subsuperficial.

La intensidad de tráfico es una expresión que intenta integrar los aspectos analizados en forma precedente, número de pasadas y masa de los vehículos. Pozzolo *et al.* (2012) indican que los procesos de producción de forrajes serán, en los próximos años, los trabajos de mayor intensidad de tráfico. Sus estudios sobre efectos del tráfico del tractor en suelos vertisoles, muestran respuestas diferentes para distintos tratamientos de labranza a nivel superficial y subsuperficial. En los estratos superiores bajo siembra directa el incremento en Resistencia a la penetración fue función del número de pasadas, mientras que en siembra convencional la intensidad de tránsito resultó el factor preponderante. A nivel subsuperficial, por lo contrario, la masa del tractor fue la causante de la mayor resistencia

mecánica en siembra directa y el número de pasadas en laboreo convencional. En cuanto a densidad aparente del suelo, los efectos no fueron relevantes en siembra directa, pero sí en convencional, donde aumentó con las primeras pasadas para luego mantenerse estable. Douglas (1994) cita como habituales para cultivos de plantas forrajeras, intensidades de tráfico anual de 110 a 186 Mg km ha⁻¹ mientras que Terminiello *et al.* (2004) determinaron intensidades de tráfico de 93 Mg km ha⁻¹ para el sistema de labranza convencional y de 21 Mg km ha⁻¹ para siembra directa. Balbuena *et al.* (2001), en una pastura polifítica, obtuvieron mermas en el rendimiento de 43,5% y 51,5% luego de transitar con intensidades de tráfico de 87 Mg km ha⁻¹ y 174 Mg km ha⁻¹, respectivamente.

Si bien los parámetros comúnmente utilizados para la medición de los efectos del tráfico, son la densidad aparente y la resistencia a la penetración, las propiedades relacionadas con el movimiento del agua son las que se ven más afectadas. Soracco (2008), sobre muestras de suelo sometidas a tres niveles de compactación, obtuvo una tasa de infiltración básica significativamente más alta en el tratamiento sin compactar, sin diferencias estadísticas entre los tratamientos compactados. Li *et al.* (2009) evaluando el efecto de la compactación del suelo a través de distintas cargas sobre el eje trasero, determinaron una disminución exponencial en la tasa de infiltración básica a medida que aumentaba la carga. Li *et al.* (2001) hallaron un efecto significativo de la compactación del suelo sobre la tasa de infiltración básica siendo la diferencia 4 a 5 veces mayor para un suelo sin transitar respecto a uno transitado. Van Dijck *et al.* (2001) examinaron el efecto de la compactación por tráfico sobre los parámetros involucrados en el movimiento del agua y encontraron diferencias significativas para la variable sortividad, siendo los valores en la huella superiores a los encontrados en el entresurco; sin embargo, la tasa de infiltración básica no tuvo el mismo comportamiento, donde la huella tuvo los menores valores respecto al entresurco, siendo la diferencia de 0,76 cm h⁻¹. Horn *et al.* (2003) reportan reducción en la conductividad hidráulica saturada con intensidades de tránsito de 1, 2, 5, 7 y 10 pasadas de un tractor pesado Lipiec *et al.* (2009) encontraron que los valores de sortividad disminuyen notablemente con el aumento del tránsito. Alakukku (1996) reporta reducciones significativas en la conductividad hidráulica producto de la compactación del suelo en la huella, en comparación con la de las áreas no disturbadas, lo cual fue asociado con un incremento de la densidad aparente y una disminución de la macroporosidad. Etana *et al.* (2012)

encontraron, luego de 14 años de efectuado el tráfico, efectos significativos de la compactación del suelo por tráfico de vehículos pesados. Tanto la resistencia a la penetración como la densidad aparente mostraron la persistencia de la compactación subsuperficial, mientras que en la conductividad hidráulica las diferencias fueron menores y de mayor variabilidad.

Con respecto a la densidad aparente, Reinert *et al.* (2001) mencionan como valores críticos para el normal crecimiento radical, 1,45 Mg m⁻³ para suelos con horizonte de textura arcillosa, 1,55 Mg m⁻³ para suelos con horizonte de textura media y 1,65 Mg m⁻³ para suelos con textura arenosa. Del mismo modo, Raghavan & Mc Kyes (1978) fijaron como límite para suelos arcillosos el valor de 1,05 Mg m⁻³ en el horizonte arable, por encima del cual se produciría una disminución del rendimiento del cultivo. Vehimeyer & Hendrickson (1948) determinaron que valores de 1,46 Mg m⁻³ constituyen el umbral crítico para el desarrollo radical de gramíneas en suelos arcillosos, mientras que para suelos franco arenosos Daddow & Warrington (1984) lo establecieron en 1,65 Mg m⁻³. No obstante, las variaciones en la respuesta en distintos tipos de suelos, conlleva la necesidad de expresar la misma en forma relativa. Carter (1990) establece que una densidad aparente relativa del 80 y 90%, respecto a la máxima densidad obtenida por el Test Proctor, favorece el normal desarrollo de los cultivos; Håkansson & Lipiec (2000) mencionan que compactaciones relativas superiores al 90% reducen el rendimiento de una amplia gama de especies vegetales.

En lo que respecta a resistencia a la penetración, Bowen *et al.* (1994) citan valores entre 0,9 y 1,5 MPa como límites para impedir el crecimiento satisfactorio de las raíces, mientras que Threadgill (1982) indicó que valores de índice de cono superiores a 1,5 MPa dificultan el normal desarrollo radicular y que por encima de 2,5 MPa el crecimiento puede detenerse.

Atendiendo a todo lo anterior, se plantea como hipótesis que el pasaje reiterado en una misma senda de tractores de baja masa por eje sobre un suelo Argiudol típico, induce procesos de compactación tanto a nivel superficial como subsuperficial. El objetivo de esta investigación fue valorar el efecto del tráfico de un tractor de bajo peso por eje sobre algunas propiedades físicas del suelo y la producción de forraje de una pradera, en un Argiudol típico bajo sistema de labranza convencional.

MATERIALES Y MÉTODOS

La experiencia se desarrolló en la Estación Experimental Julio Hirschhorn de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la U.N.L.P., 34°55' S, 57°57' W, sobre un suelo clasificado como Argiudol típico (Soil Taxonomy, 1999), con la siguiente descripción analítica del perfil: **Ap 0-18 cm:** textura franco limosa a franca; estructura semimigajosa, media, débil; raíces abundantes y finas. **BA 18-29 cm:** textura franco arcillosa; estructura en prismas compuestos irregulares, moderada a fuerte que rompe en bloques subangulares irregulares; raíces finas y comunes; **Bt₁ 29-50 cm:** textura arcillosa; estructura en prismas compuestos irregulares, gruesos, fuerte. **Bt₂ 50-90 cm:** textura arcillosa; estructura en prismas compuestos irregulares, muy gruesos, fuerte; raíces ausentes. El tapiz vegetal correspondía a una pradera base alfalfa (*Medicago sativa* L) implantada bajo el sistema de labranza convencional con un pasaje de arado de reja y vertedera y dos de rastra, ambos a 15 cm de profundidad. El cultivo estuvo acompañado por Rye Grass anual (*Lolium multiflorum* Lam.) y Trébol Blanco (*Trifolium repens* L). Para la realización de los distintos tratamientos, se utilizó un tractor 2WD Zanello V210, con una carga en el eje delantero de 1210 kg y en el eje trasero de 2600 kg. El contenido de humedad del suelo previo al tráfico fue de 33,36% para la profundidad de 0-200 mm; 32,29% para el intervalo 200-400 mm y 31,27% para 400-600 mm de profundidad. Los tratamientos consistieron en cinco pasajes del tractor hasta cubrir el 100% de la superficie (5p), tres pasajes hasta cubrir el 100% de la superficie (3p) y un tratamiento sin tránsito (T), correspondientes a intensidades de tránsito de 200, 120 y 0 Mg.km.ha⁻¹, respectivamente, conformando parcelas de 12 m de ancho y 50 m de longitud.

Se utilizó un diseño en bloques totalmente aleatorizados, con tres repeticiones, sobre los cuales se realizaron los diferentes tratamientos. Para la cuantificación de la compactación inducida por el tráfico, se determinó: resistencia a la penetración mediante un penetrómetro electrónico de cono Rimyck CP20, tomando lecturas cada 25 mm, desde la superficie hasta una profundidad de 600 mm, en acuerdo con ASAE S312.2 (1993), realizando 30 repeticiones por tratamiento, en cada parcela; humedad del suelo por el método gravimétrico a intervalos de 100 mm, desde la superficie hasta los 600 mm de profundidad, realizando tres determinaciones por tratamiento; infiltración acumulada, sortividad y tasa de infiltración básica, por medio de un permeámetro o infiltrómetro de disco, ubicado sobre la superficie del terreno, según la metodología indicada por Gil (2002), tomando tres mediciones por cada tratamiento y repetición; densidad aparente a través del método del cilindro (Forsythe, 1975), con un cilindro de 100 mm de alto y 77 mm de diámetro, en dos intervalos de profundidad, 0-100 mm y 100-200 mm y tres repeticiones por tratamiento y parcela. Los efectos sobre la productividad de la

pradera se cuantificaron a través de mediciones de la materia seca en 3 momentos de medición: 3, 7 y 12 meses posteriores al tráfico. Para ello se tomaron 5 muestras al azar por tratamiento y parcela por medio de un aro de 0,25 m², siendo el material cortado con tijera a la altura de un puño (0,10 m). La información se completó con la curva de compactación Proctor (Terzaghi y Peck, 1967) en dos intervalos de profundidad (0-200 mm y 200-400 mm), con tres repeticiones para cada profundidad, y 5 puntos de humedad, dos por debajo y dos por encima de la humedad crítica de compactación, con el objetivo de conocer la situación inicial de compactabilidad del suelo al momento de efectuar el tráfico, a partir de muestras obtenidas de tres sectores del lote experimental, en correspondencia con los bloques establecidos. Los resultados se analizaron mediante un ANOVA y las medias se compararon por el Test de la diferencia mínima significativa (LSD), con un nivel de probabilidad de 0,05 (SAS Institute, 1996), siendo las variables vinculadas al movimiento del agua en el suelo ajustadas por regresión no lineal por el modelo de Philip (1957) previo al ANOVA

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Test Proctor

En la Figura 1 se presenta la curva de compactación Proctor para los intervalos de profundidad de 0-200 mm y 200-400 mm, alcanzando la máxima compactación con diferentes niveles de humedad crítica para cada profundidad. El contenido de humedad del suelo, al momento de la instalación de los tratamientos fue del 32,29% para el estrato de 0-200 mm y del 33,36% para 200-400 mm, en ambos casos superiores a la humedad crítica. Esto explicaría, en parte, que no se haya alcanzado la máxima densidad aparente de compactación cuando se transitó con el tractor, junto a la masa del mismo sobre el eje de tracción.

Infiltración

En la Tabla 1 se visualizan los valores de infiltración acumulada para las distintas instancias de medición. Durante la primera medición, los menores volúmenes de infiltración se corresponden con la mayor intensidad de tráfico, coincidiendo con lo reportado por Alakukku (1996), Horn *et al.* (2003) y Soracco (2008). Si bien en la segunda medición se mantienen las diferencias significativas entre el tratamiento sin tránsito respecto a los que recibieron pisadas del tractor, en la última instancia no se observan diferencias significativas entre ningún tratamiento. Esto podría deberse en parte al bajo peso del tractor utilizado,

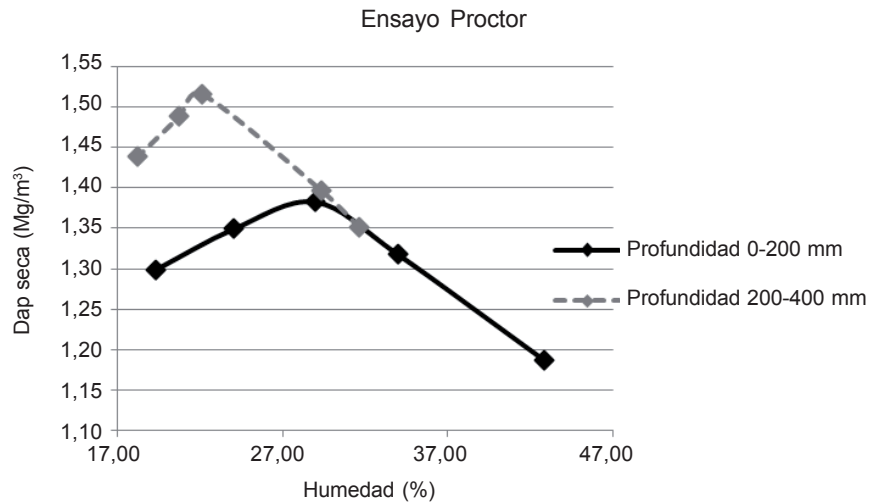


Figura 1. Test Proctor para dos profundidades: 0-200 mm y 200-400 mm.

Figure 1. Proctor Test for two depths: 0-200 mm and 200-400 mm.

Tabla 1. Valores medios de infiltración acumulada (mm) a los 40 minutos de iniciado el proceso, para cada momento de medición.

Table 1. Mean values of cumulative infiltration (mm) after 40 minutes, for each measuring moment.

Momento de medición	Tratamiento		
	5 pasadas	3 pasadas	Testigo
Primera medición	2,721 a	4,447 b	8,01 c
Segunda medición	3,596 a	3,45 a	5,76 b
Tercera medición	7,192 a	5,673 a	6,48 a

Infiltración acumulada a los 40 minutos (mm). Valores medios seguidos por letras diferentes en las filas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para un mismo momento de medición.

Cumulative infiltration at 40 minutes (mm). Means values followed by different letters in the same line indicate significant differences ($p < 0,05$) between treatments for one measurement times.

como así también a las características de resiliencia del suelo, en acuerdo con lo detallado por Taboada (2005). Luego de un año de realizado el ensayo, el suelo muestra una recuperación para esta variable contrariamente a lo observado por Etana *et al.* (2012) quienes encontraron diferencias en la conductividad hidráulica por tránsito de vehículos pesados, luego de 14 años.

La sortividad tuvo también, durante el primer momento de medición, diferencias significativas entre los tratamientos (Tabla 2), siendo el T el de mayor sortividad, seguido por el tratamiento de 3p y por último el de 5p, coincidiendo con lo informado por Lipiec *et al.* (2009) pero en desacuerdo con lo reportado por van Dijck *et al.* (2001)

quienes encontraron mayores valores de sortividad sobre la huella respecto al entre surco. Sin embargo, las diferencias encontradas tienden a desaparecer en las siguientes mediciones, indicando que la persistencia de la compactación por tránsito de tractores de bajo peso sobre el eje y su efecto sobre la sortividad, es de corta duración, para este suelo, bajo sistema de labranza convencional.

Considerando los resultados obtenidos, podría suponerse que existió cierto grado de recuperación de la estructura del suelo, a través de la acción de distintos mecanismos bióticos y abióticos, en acuerdo con lo expresado por Taboada (2005). Esto se habría visto favorecido por la alternancia de períodos húmedos con secos, ocurridos

Tabla 2. Valores medios de sortividad ($\text{cm h}^{-1/2}$), para cada momento de medición.Table 2. Mean values of sorptivity ($\text{cm h}^{-1/2}$), for each measuring moment.

Momento de medición	Tratamiento		
	5 pisadas	3 pisadas	Testigo
Primera medición	3,126 a	4,626 b	8,894 c
Segunda medición	3,569 a	3,437 a	4,389 a
Tercera medición	6,991 a	6,016 a	5,797 a

Sortividad ($\text{cm h}^{-1/2}$). Valores medios seguidos por letras diferentes en las filas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para un mismo momento de medición.

Sorptivity ($\text{cm h}^{-1/2}$). Means values followed by different letters in the same row indicate significant differences ($p < 0,05$) among treatments within each measuring moment.

Tabla 3. Valores medios de tasa de infiltración básica (cm h^{-1}), para cada momento de medición.Table 3. Mean values of basic infiltration rate (cm h^{-1}), for each measuring moment.

Momento de medición	Tratamiento		
	5 pisadas	3 pisadas	Testigo
Primera medición	2,182 a	3,246 a	5,560 b
Segunda medición	3,249 a	2,574 a	7,061 b
Tercera medición	8,188 a	7,496 a	9,110 a

Tasa de infiltración básica (cm h^{-1}). Valores medios seguidos por letras diferentes en las filas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para un mismo momento de medición.

Basic infiltration rate (cm h^{-1}). Means values followed by different letters in the same line indicate significant differences ($p < 0,05$) within each measuring moment.

durante el ciclo del ensayo, sumado al establecimiento de las especies herbáceas y el desarrollo radical de las mismas en el estrato superior.

En lo que respecta a la tasa de infiltración básica (Tabla 3), en las dos primeras instancias de medición se observó que el tratamiento T presentó valores significativamente superiores a los tratamientos compactados, no encontrándose diferencia entre estos últimos, coincidiendo con van Dijck *et al.* (2001) y Li *et al.* (2009). Sin embargo, el tratamiento sin traficar nunca presentó valores mayores a 2,5 veces los encontrados en el tratamiento de 5p, en desacuerdo con lo mencionado por Li *et al.* (2001) quienes citan diferencias de 4 a 5 veces mayor para un suelo sin transitar respecto a uno transitado. Esto permitiría inferir que la tasa de infiltración básica se comporta como una variable menos sensible ante distintas intensidades de tráfico que las otras variables del proceso de infiltración.

Densidad aparente del suelo

En la Tabla 4 se observan los valores de densidad aparente, en los tres momentos de medición, para los estratos asociados a las mediciones de infiltración. Si bien en nin-

guna instancia se alcanzaron los umbrales críticos citados por Reinert *et al.* (2001), Vehimeyer & Hendrickson (1948) y Daddow & Warrington (1984), durante la primera medición se visualizan diferencias estadísticas significativas entre el T y los tratamientos que recibieron tráfico que superan el valor citado por Raghavan y Mc Kyes (1978) para el normal desarrollo del cultivo. Sin embargo, en las restantes instancias de medición, no se visualizaron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos, coincidiendo con lo citado por Alakukku (1996), quien manifiesta una menor sensibilidad de este parámetro en relación a la resistencia a la penetración y a las propiedades indicadoras del movimiento del agua en el suelo. La ausencia de diferencias entre el testigo y los tratamientos de tránsito en la segunda y tercera instancias de evaluación parecieran consecuencia tanto de una consolidación del tratamiento sin tránsito, de $0,917$ a $1,049 \text{ Mg m}^{-3}$, en los primeros $0,10 \text{ m}$, como también de una reducción de la densidad aparente de los tratamientos de tránsito. No obstante lo expuesto, en acuerdo con Taylor & Burt (1987) los efectos adversos del tránsito sobre la compactación del suelo acontecen principalmente, en los sistemas con remoción en la primer pasada, por lo que resulta compren-

Tabla 4. Densidad aparente (Mg m^{-3}) tomada a dos profundidades para cada tratamiento, en los tres momentos de medición
 Table 4. Dry bulk density (Mg m^{-3}) taken at two depths for each treatment, at three measuring moments.

Momento de medición	Profundidad (mm)	Tratamiento		
		5 pisadas	3 pisadas	Testigo
Primera medición	0 - 100	1,145 b	1,085 b	0,917 a
	100 - 200	1,245 b	1,248 b	1,042 a
Segunda medición	0 - 100	1,097 a	1,057 a	1,03 a
	100 - 200	1,077 a	1,072 a	1,125 a
Tercera medición	0 - 100	1,05 a	1,088 a	1,049 a
	100 - 200	1,108 a	1,11 a	1,088 a

Densidad aparente seca (Mg m^{-3}). Valores medios seguidos por letras diferentes en las filas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada profundidad en un mismo momento de medición.

Dry bulk density (Mg m^{-3}). Means values followed by different letters in the same line indicate significant differences ($p < 0,05$) among treatments for each depth at one measuring moment.

sible que no existan mayores diferencias entre 3 y 5 pasadas del tractor. Además, el estado mecánico del suelo al momento del tráfico, producto de la labranza convencional a una profundidad de 200 mm, con valores de resistencia a la penetración de 0,5 a 1 MPa para los estratos de 0-100 y 100 a 200 mm, respectivamente y registros de densidad aparente de aproximadamente 1 Mg m^{-3} , habría sido determinante de la fuerte modificación ocasionada en dichas profundidades. Por lo contrario, el estado de precompactación del suelo por debajo de la profundidad de trabajo permite inferir escasos efectos sobre un parámetro poco sensible, a mayores profundidades, en este tipo de suelos.

Al comparar los valores de densidad con los obtenidos en el ensayo Proctor se observa que no se alcanzó el máximo nivel de compactación del suelo, lo cual puede asociarse a que la humedad gravimétrica al momento de la medición resultó superior a la humedad crítica para ambos estratos al momento de realizar el tránsito, siendo la tensión neutra asociada a las características de las curvas de saturación de suelos arcillosos, determinante de la disminución de la compactabilidad del suelo. La presión en el área de contacto rueda suelo, en cambio, resultó suficiente para modificar significativamente la densidad a nivel superficial en los tratamientos de 3 y 5 pasadas. Al inicio del ensayo la compactación relativa del suelo entre 0-100 mm fue del 82% para el tratamiento de 5 pasadas y del 90% para el estrato de 100-200 mm. Esto implica que los valores se aproximaron, al límite superior indicado por Carter (1990) como adecuado para el desarrollo de los cultivos y fueron cercanos a los identificados por Hakansson & Lipiec (2000)

como posibles de afectar el normal crecimiento de los cultivos, lo cual puede haber incidido sobre el desarrollo de la pastura. Por otra parte, en el estrato de 200 a 400 mm la humedad durante el tránsito se alejó en mayor medida de la crítica y las cargas aplicadas en los tratamientos de tránsito fueron significativamente menores a las indicadas por Håkkanson *et al.* (1988) y Håkkanson & Danfors (1981) como posibles de causar compactación a nivel sub-superficial. Pese a ello, la densidad aparente del suelo no se mantuvo constante con el paso del tiempo, siendo los valores al final del proceso de solamente el 76,1% y 73,5% de la máxima compactación Proctor, resultando recomendable por lo tanto su seguimiento y evaluación en los períodos críticos del cultivo.

Resistencia a la penetración

En la primera instancia de medición, exceptuando la profundidad 0-100 mm del tratamiento T, los valores de resistencia a la penetración siempre superaron el valor de 0,9 MPa mencionado por Bowen *et al.* (1994) como límite inferior para impedir el crecimiento satisfactorio de las raíces (Fig. 2). Sin embargo, tomando el valor de 1,5 MPa citado por Threadgill (1982), por encima del cual se dificulta el normal desarrollo radicular, únicamente se supera dicho valor en la profundidad 500-600 mm en los tratamientos que recibieron tráfico. La misma situación se manifiesta en la segunda instancia de medición, para todos los tratamientos, a partir de 300-400 mm de profundidad y en la tercera instancia en los primeros 300 mm y en el rango 400-600 mm, para los tratamientos traficados. Esto demuestra que,

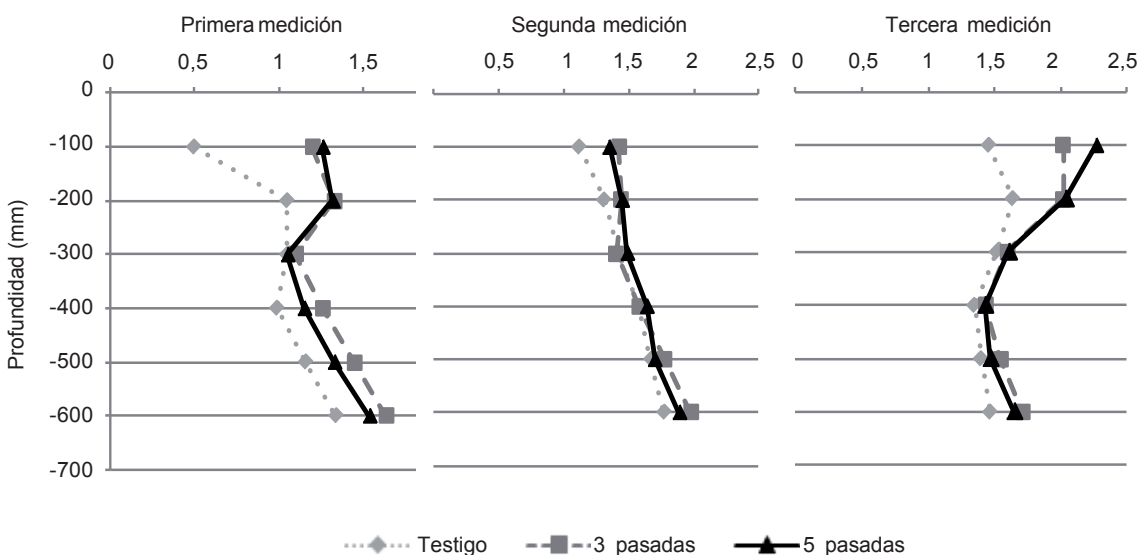


Figura 2. Variación del perfil de resistencia a la penetración para cada tratamiento en tres momentos de medición.
Figure 2. Profile variation of penetration resistance for each treatment in three measuring moments.

si bien el tractor utilizado tenía una masa por eje inferior a 6 Mg, mencionada por Håkansson *et al.* (1988) como responsable de compactaciones subsuperficiales, el tráfico reiterado comprometió a capas profundas del perfil, afirmando lo expresado por Draghi (2005) y Jorajuría *et al.* (1997). No obstante, no se registraron valores superiores a 2,5 MPa citados por Threadgill (1982) como limitantes del crecimiento radicular.

Analizando el contenido de humedad para cada instancia de medición (Tabla 5), se observa en la primera medición que no hubo diferencias significativas de humedad en los primeros 300 mm y en los estratos 400-500 mm y 500-600 mm, pudiendo atribuir los valores de resistencia a la penetración al efecto del tránsito del tractor. Sin embargo, si hubo diferencias de humedad en el estrato 300-400 mm entre el tratamiento T y 3p, siendo 3p el de menor humedad, pudiendo explicar en parte el mayor valor de resistencia a la penetración para dicho tratamiento en esa profundidad. En la segunda medición, se visualizan diferencias significativas de humedad a partir de los 300 mm, siendo para la profundidad 300-400 mm el tratamiento 5p el de menor humedad y 3p el de mayor humedad, mientras que en el estrato 400-600 mm el tratamiento 5p es el de mayor humedad y T el de menor, explicando en parte los valores de resistencia a la penetración, en tanto que, en la profundidad 500-600 mm, los valores de resistencia a

la penetración no verifican la misma situación, pudiendo atribuirse estas diferencias al tráfico del tractor. En la última medición, el tratamiento 5p tuvo un contenido de humedad significativamente menor al T para los primeros 200 mm, sin embargo, no se diferenció del 3p, pudiendo explicar las diferencias encontradas en los valores de resistencia a la penetración a la presión de inflado de los neumáticos. Esto mismo se visualiza en el estrato 200-400 mm y 500-600 mm, siendo el tractor el responsable de los incrementos de RP para los tratamientos de tráfico.

Cuando se analiza el perfil del suelo, en las tres instancias de medición, se observa que las mayores diferencias de resistencia a la penetración entre el T y los tratamientos con tráfico están en el estrato 0-100 mm, siendo las mismas significativas (Fig. 2). Esto podría atribuirse a la presión específica que ejerce el rodado sobre el suelo, que habría superado la capacidad portante del mismo, pese al bajo peso sobre el eje (Håkansson & Reeder, 1994; Jorajuría *et al.*, 1997; Alakukku *et al.*, 2003; Botta *et al.*, 2006). Las mayores diferencias encontradas fueron en la primera medición, con un incremento significativo del 152% para 5p y de 140% para el tratamiento de 3p.

De manera similar a lo que ocurre con la densidad aparente para los estratos de 0-100 mm y de 100 a 200 mm de profundidad no se visualizan mayores diferencias

Tabla 5. Humedad del suelo (g/g) en las tres instancias de medición y para seis rango de profundidad.
Table 5. Soil Moisture (g/g) in the three measuring moments instances and for six depth ranges.

Momento de medición	Trat	Profundidad (mm)					
		0-100	100-200	200-300	300-400	400-500	500-600
Primera medición	5p	26 a	27 a	27 a	27 ab	27 a	30 a
	3p	26 a	28 a	27 a	26 a	26 a	28 a
	T	29 a	28 a	26 a	28 b	26 a	30 a
Segunda medición	5p	19 a	20 a	20 a	19 a	26 b	25 b
	3p	18 a	23 a	21 a	23 b	22 a	23 ab
	T	21 a	25 a	21 a	20 ab	21 a	21 a
Tercera medición	5p	17 a	20 a	20 a	23 a	24 b	26 a
	3p	18 ab	21 ab	21 a	22 a	22 ab	25 a
	T	20 b	22 b	21 a	22 a	21 a	25 a

Humedad del suelo (g/g). Valores medios seguidos por letras diferentes en las filas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos para cada profundidad en un mismo momento de medición.

Soil moisture (g/g). Means values followed by different letters in the same row indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments for each depth within each measuring moment.

entre los tratamientos de 3 y 5 pasadas en prácticamente ninguna profundidad e instancia de medición. Asimismo, en los 300 mm de profundidad, en todos los momentos de medición, se observa que los tres tratamientos coinciden en un rango de resistencia a la penetración relativamente próximo, pudiendo adjudicarse este comportamiento al cambio de horizonte de BA a Bt, que se produce a esa profundidad. No obstante, la significancia de las diferencias entre el testigo y tratamiento de 5 pasadas se mantiene en todo el perfil evaluado en todas las instancias de medición hasta los 600 mm, a excepción de los estratos de 200 a 300 mm y de 400 a 500 mm en la primera y segunda instancia de medición respectivamente. Únicamente el tratamiento de 3 pasadas del tractor no se diferencia del testigo en los estratos de 200-300 mm y 300-400 mm en el segundo momento de medición. Por lo tanto, es posible afirmar que se detectan, efectos adversos del tráfico repetido aún con tractores de bajo peso sobre el eje, tanto a nivel superficial como subsuperficial, de manera coincidente con lo expuesto por Raghavan *et al.* (1976), Botta *et al.* (2002), Botta *et al.* (2008) y Tolon Becerra *et al.* (2009). Sin embargo, los resultados difieren parcialmente con lo citado por Jorajuría & Draghi (2000), Jorajuría *et al.* (1997) y Draghi (2005), ya que antes de llegar al número de 10 pasadas se observaron efectos del tránsito reiterado, aunque no se superan los valores críticos que limitan o restringen el crecimiento radical.

Materia seca de pradera

En la Tabla 6, se visualizan los efectos del tráfico sobre el rendimiento de la pradera, en los diferentes momentos de corte. Únicamente la intensidad de tráfico de 200 Mg km ha⁻¹ del tratamiento 5p, provocó una reducción significativa en el rendimiento de 12,1%, respecto al T. Esta merma es inferior a la citada por Balbuena *et al.* (2001), quienes obtuvieron disminuciones de 43,5% y 51,5% con intensidades de tráfico de 86,9 Mg km ha⁻¹ y 174 Mg km ha⁻¹, respectivamente. Asimismo, el tratamiento de 3p, equivalente a 120 Mg km ha⁻¹, alcanzó una producción cercana al testigo. Estos resultados pueden relacionarse parcialmente al incremento de la resistencia a la penetración en los tratamientos con tráfico, coincidiendo con Jorajuría & Draghi (2000). Asimismo, los bajos valores de las variables involucradas en el movimiento del agua en el perfil del suelo, registrados durante las primeras etapas de crecimiento de las especies, pudieron incidir en los resultados de rendimiento hallados.

En relación con los resultados obtenidos, el uso de tractores de baja carga sobre el eje resulta una alternativa interesante para minimizar los efectos del tránsito en los sistemas de producción de forraje. Si bien se detectan efectos en los parámetros físicos más sensibles para detectar compactación, tanto a nivel superficial como subsuperficial, la densidad aparente y la infiltración acumulada no muestran diferencias al final del período de evaluación. La re-

Tabla 6. Rendimiento de Materia Seca de pradera (kg ha^{-1}) y disminución del rendimiento de los tratamientos traficados respecto del Testigo.

Table 6. Dry matter yield (kg ha^{-1}) and yield decrease of treatments undergoing traffic compared to the control.

Tratamiento	Materia Seca (kg ha^{-1})	Disminución del rendimiento (%)
Testigo	1602,11 b	0
3 pasadas	1579,56 ab	1,41
5 pasadas	1408,09 a	12,11

Rendimiento de materia seca (kg ha^{-1}). Valores medios seguidos de letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) entre tratamientos.

Dry matter yield (kg ha^{-1}). Means values followed by different letters indicate significant differences ($p < 0.05$) among treatments.

sistencia a la penetración del suelo en forma semejante a lo determinado por Pozzolo *et al.* (2012) no muestra grandes variaciones entre los tratamientos de 3 y 5 pasadas a nivel subsuperficial como tampoco resulta visible una concentración de los efectos en un estrato determinado por debajo de los 300 mm, seguramente producto del estado de precompactación del suelo. El uso de tractores de baja relación peso/potencia para la cosecha de forrajes, en acuerdo con Márquez Delgado (2012), resulta importante para no superar el límite de 6 Mg de masa por eje indicado por Håkansson & Danfors (1981) para no causar compactación subsuperficial. Sin embargo, no resulta suficiente la disminución del peso propuesta por Smith & Dickson (1990) para eliminar el problema, sino que resulta necesario también reducir el número de pasadas en una misma senda. Atendiendo a ello, es posible variar en los diferentes ciclos productivos, los lugares de tránsito de las máquinas involucradas en el proceso, tratando de no alcanzar el número de 5 pasadas que redujo el rendimiento en materia seca de la pradera.

CONCLUSIONES

1) Intensidades de tráfico de $200 \text{ Mg km ha}^{-1}$ provocan disminución en el rendimiento de materia seca de un pradera.

2) El pasaje reiterado en una misma senda de tractores de baja masa por eje induce en el suelo con pradera modificación de las propiedades físicas evaluadas a nivel superficial y subsuperficial, de carácter temporal y de mayor magnitud en los primeros estratos del suelo.

3) La resistencia a la penetración es un parámetro más sensible a los efectos de identificar modificaciones del estado físico del suelo como consecuencia del tráfico vehicular.

4) El uso de tractores de bajo peso por eje en los sistemas de cosecha de forrajes constituye una alternativa que reduce pero no elimina la extensión de los aspectos adversos del tráfico sobre la impedancia mecánica del suelo y la productividad de la pradera.

BIBLIOGRAFÍA

- 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 & Tillage Research* Amsterdam, Netherlands. Vol. 37: 211-222.
- Alakukku, L; P Weisskopf; WCT Chamen; FGJ Tjink; JP van der Linden; S Pires; C Sommer & G Spoor. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review Part 1. Machine/soil interactions. *Soil & Tillage Research* 73: 145-160.
- ASAE Standards. 1993 Soil Cone Penetrometer, 40th ed. ASAE, St. Joseph, MI ASAE. American society of Agricultural Engineers. In Standard of Soil Cone Penetrometer. Ed. St. Joseph, 1992. 611 pp (ASAE S 313.2)
- Balbuena, R; P Mac Donagh; J Marquina; D Jorajuría; A Terminiello & J Claverie. 2001. Wheel Traffic Influence on Poplar Regeneration and Grass Yield. *Byosystems Engineering* (2002). 81(4): 379-384.
- Botta, GF; D Jorajuría & M Draghi. 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics* 39(1): 47-54
- Botta, GF; D Jorajuría; HG Rosatto & C Ferrero. 2006. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil & Tillage Research* 86: 9-14.

- Botta, GF; A Tolon Becerra; F Bellora & M Tourn. 2008. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil & Tillage Research* 103(2009): 381-386.
- Bowen, HD; TH Garner & DH Vaughn. 1994. Advances in soil-plant dynamics. In: ASAE. Advances in soil dynamics. St. Joseph. pp. 255-280.
- Carter, MR. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Science* 70: 425-433.
- Chancellor, WJ. 1977. Compaction of Soil by Agricultural Equipment. In: Bulletin 1881, Ed.: University of California. Division of Agricultural Sciences. 32 pp.
- Daddow, RL & GE Warrington. 1984. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. USDA -F5, Watershed systems development group REP. WSD6-TN-00005, USDA-FS, Fort Collins, CO.
- Douglas, JT. 1994. Responses of perennial forage crops to soil compaction in Crop Production. Elsevier Science B. V. pp. 343-364.
- Draghi, LM. 2005. Mecanización del huerto frutal: Tráfico controlado con vehículos de bajo peso/eje y altas intensidades de tráfico. En: Reología del suelo agrícola bajo tráfico. ISBN 950-34-0334-0 Editor Científico: Daniel Jorajuría. Ed.: Universidad Nacional de La Plata. pp. 85-106.
- Etana, A; M Larsbo; T Keller; J Arvidsson; P Schjonning; J Forkman & N Jarvis. 2012. Persistent subsoil compaction and its effects on preferential flow patterns in a loamy till soil. *Geoderma* 192(2013): 430-436.
- Gil, RC. 2002. Manual de utilización del Infiltrómetro y permeámetro de disco. Instituto de Suelos. INTA Castelar.
- Forsythe, W. 1975. Manual de Laboratorio de Física de suelos. Instituto Iberoamericano de Ciencias Agrícolas, San José. pp. 39-45.
- Håkansson, I. 1994. Subsoil compaction caused by heavy vehicles – a long-term threat to soil productivity. *Soil & Tillage Research* 29: 105-110.
- Håkansson, I & B Danfors. 1981. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: Proceedings of 7th. Int. Conf. of ISTVS, Ed.: ISTVS Hanover, NH, USA.
- Håkansson, I & RC Reeder. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Research* 29: 277-304.
- Håkansson, I & J Lipiec. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in a studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research* 53: 71-85.
- Håkansson, I; WB Voorhees & H Riley. 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil & Tillage Research* 11: 239-282.
- Horn, R; T Way & J Rostek. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil & Tillage Research* 73: 101-106.
- Jorajuría, D & L Draghi. 1997 The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. *Journal of Agricultural Engineering Research* 66(4): 261-265.
- Jorajuría, D & L Draghi. 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 4(3): 445-452.
- Jorajuría, D; L Draghi & A Aragón. 1997. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of Lolium/Trifolium grassland. *Soil & Tillage Research* 41: 1-12.
- Li, YX; JN Tullberg & DM Freebairn. 2001. Traffic and residue cover effects on infiltration. *Australian Journal of Soil Research* 39: 239-247.
- Li, YX; JN Tullberg; DM Freebairn & HW Li. 2009. Functional relationships between soil water infiltration and wheeling and rainfall energy. *Soil & Tillage Research* 104: 156-163.
- Lipiec, J; A Wojciga & R Horn. 2009. Hydraulic properties of soil aggregates as influenced by compaction. *Soil & Tillage Research* 103: 170-177.
- Márquez Delgado, L. 2012. Tractores Agrícolas: tecnología y utilización. Blake y Helsey España S.L., Editores. Madrid, España. 844 pp.
- Pozzolo, OR; JM Gange; HJ Ferrari; JP Hegglin; S Rivarola; C Curró & JJ De Battista. 2012. Comportamiento de Suelos Vertisoles al Tráfico en Sistemas de Siembra Directa y Convencional. <http://www.cosechaypostcosecha.org/data/articulos/maquinaria/ComportamientoSuelosVertisoles.asp> Diciembre 2012
- Raghavan, G & E, Mc Kyes. 1978. Vehicle compaction for agricultural tyres. *Transaction of the ASAE* 20: 218-220
- Raghavan, GMC; E Kyes & J Chase. 1976. Soil compaction patterns caused by off-road vehicles in Eastern Canada agricultural soil. *Journal of Terramechanics* 13: 107-115.
- Reinert, D; JM, Reichert & VR Silva. 2001. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. En: CARLESSO, R; PETRY, MT; ROSA, GM,
- CERETTA, CA. ed. Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul. Santa Maria, pp. 114-133.
- SAS Institute. 1996. SAS/STATU Users Guide. Version 6.03 Edition. Cary, NC.
- Smith, DL & JW Dickson. 1990. Contributions of weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineer Research* 46: 13-29.
- Soil Taxonomy. 1999. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second edition, Soil Survey Staff, USDA, Natural Resources Conservation Service. N° 436.
- Soracco, CG. 2008. Efecto de la compactación sobre el sistema poroso del suelo en diferentes situaciones de labranza; modelización y realidad. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. 150 pp.
- Taboada, MA. 2005. Efectos del pastoreo y pisoteo animal sobre las propiedades físicas de los suelos. En: Reología del suelo agrícola bajo tráfico. ISBN 950-34-0334-0 Editor Científico: Daniel Jorajuría. Ed.: Universidad Nacional de La Plata. pp. 131-142.
- Taylor, J. & E. Burt. 1987. Total axle load effect on soil compaction. *Journal of Terramechanics* 24: 179-186.
- Terminiello, A.; RH, Balbuena; Draghi, L.; Claverie, J.; Palancar, T. & D. Jorajuría. 2004. Comportamento do solo sob tráfego em dois sistemas de preparo do solo. *Revista de la Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola* 24-1: 158-166.
- Terzaghi, K. & R. B. Peck. 1967. Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd edn. John Wiley, New York, London, Sydney.
- Threadgill, ED. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE* 25(4): 859-867.

Tolon Becerra, A; GF Botta; X Lastra Bravo; M Tourn; F Bellora Melcon; J Vazquez; D Rivero; P Linares & G Nardon. 2009. Soil compaction distribution under tractor traffic in almond (*Prunus amygdalus* L.) orchard in Almería España. *Soil & Tillage Research* 107(2010): 49-56.

van Dijck, SJE & ThWJ van Asch. 2001. Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyard and orchards and its effect on infiltration in southern France. *Soil & Tillage Research* 63(2002): 141-153.

Veihmeyer, FJ & AH Hendrickson. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Science* 65: 487-493.