

MÁQUINAS AGRÍCOLAS

SOBRECOMPACTACIÓN DEL SUELO AGRICOLA PARTE I: INFLUENCIA DIFERENCIAL DEL PESO Y DEL NÚMERO DE PASADAS

Daniel Jorajuria & Laura Draghi¹

RESUMEN

Han sido objetivos principales de este trabajo, tanto el discriminar la responsabilidad de las variables independientes, peso y número de pasadas, en la distribución vertical de la compactación inducida, como obtener evidencia que permita decidir la conveniencia entre conjuntos ligeros que rueden muchas veces sobre la superficie trabajada, o conjuntos más grandes y pesados que resuelvan la tarea con menos pasadas. Se trabajó sobre un suelo de textura fina, con alta humedad presente. Las variables experimentales independientes configuraron dos tratamientos, tractor pesado y ligero, y tres diferentes número de pasadas, 1, 5 y 10, resultaron en seis subtratamientos de diferente intensidad de tráfico, más una parcela testigo sin tráfico. Los resultados no mostraron diferencias entre los tratamientos pesado y ligero, en el rango más superficial evaluado, sin embargo siempre fueron muy significativas las diferencias si se considera el rango de mayor profundidad. Disminuciones del rendimiento del pastizal del orden de 7 a 25% fueron medidas en las zonas adyacentes a las huellas, mientras que esas pérdidas ascendieron al rango de 52 a 76% dentro de la impronta dejada por las huellas del tráfico. Se pudo concluir que, el número de pasadas reiteradas sobre la misma senda, puede emular, e incluso reemplazar, al factor peso sobre el eje, en la responsabilidad principal de inducir compactaciones en el subsuelo. Diez pasadas, es el número crítico de rodadas, a partir del cual se pierden las ventajas de traficar con un tractor ligero, como alternativa a uno pesado con menos pasadas.

Palabras clave: intensidad del tráfico, Densidad aparente, resistencia a la penetración, producción del pastizal

OVERCOMPACTION OF AGRICULTURAL SOIL PART I: DIFFERENTIAL INFLUENCE OF AXLE LOAD AND NUMBER OF PASSES

ABSTRACT

The main objectives of this research were: to determine the responsibility of weight, number of passes and independent variables, on the vertical distribution of subsoil compaction and to obtain evidence to decide upon the convenience of matching equipments with light or heavy tractors, according to their differences in passes on the field. Field tests were carried out on grassland, on a typic Argiudol with a soil moisture below, but near to field capacity. The dependent experimental variable was the induced soil compaction and was related to bulk density (assessed with gamma probe), penetration resistance (measured with an electronic cone penetrometer), and remaining grassland yield, six and eight months after traffic treatments were applied. Data from two tests, with two phases of data logging were analysed, totalizing a three year period of assessment pursuit. Results did not show differences between heavy and light treatments in the shallower depth range. Nevertheless, highly significant differences were shown if the deepest range is considered. Decrease in grassland yields ranging from 7 to 25% were measured in out-of-track areas, and 52 to 76% in in-track areas. It was concluded that the number of repeated passes on the same tramlines of a light tractor, can do as much or even greater damage than the heavier tractor with fewer passes. Ten is the critical number of passes, beyond it, advantages taken from the use of a light tractor are lost.

Key words: traffic intensity, bulk density, penetration resistance, grassland yield

INTRODUCCIÓN

El proceso de globalización está acelerando la distribución mundial de nuevas tecnologías y con ellas los problemas de su entorno. El incremento en la capacidad de trabajo, la reducción de costos en jornales por operador, la mayor facilidad para encontrar la oportunidad de labor dentro del calendario agrícola, son frecuentemente citados como argumentos que justifican el crecimiento en tamaño de la maquinaria agrícola en la amplia mayoría de los sistemas reales de producción (Carpenter & Fauser, 1983; Draghi et al., 1989).

Descompactar el suelo por debajo de la profundidad de arada normal es un problema cuya resolución, o al menos disminución, es siempre de alta honerosidad, generalmente complicado técnicamente por las altas demandas de potencia y equipos de labranza menos frecuentes y a veces imposible de resolver en términos económicamente viables (Håkansson & Reeder, 1994). Si a esto sumamos el hecho de que todos los agentes naturales que favorecen la descompactación tales como: alternancia de ciclos de humedad-sequía, congelamiento-descongelamiento, actividad biológica, acumulación de materia orgánica y labranza, disminuyen su participación en la medida que descendemos en el perfil del suelo, estamos frente a un problema acumulativo, incrementándose, o al menos manteniéndose, de un ciclo productivo al siguiente.

Smith & Dickson (1990) revisaron varios antecedentes que evidencian que la presión en la zona de contacto rueda/suelo puede influir en la compactación superficial. Sin embargo la compactación subsuperficial, para estos autores, aquella que se ubica a una profundidad mayor o igual a 400 mm, está directamente influenciada por el peso sobre el eje, independientemente de cual sea la presión sobre el suelo.

Concluyen en la necesidad de reducir el peso total de los equipos de uso agrícola. Håkansson (1994) cita también haber encontrado una fuerte y directa dependencia de la compactación en superficie con la presión en la interfase rueda/suelo.

En este marco conceptual Jorajuria et al. (1995, 1997) proponen dividir la compactación inducida por tráfico agrícola en dos problemas diferentes. Diferentes por la responsabilidad independiente que encuentran en las variables peso sobre el eje y presión en el área de contacto rueda/suelo. Diferentes por la magnitud del problema que ocasionan, una se resuelve con el laboreo convencional y la otra requiere técnicas especiales. Diferentes por la evolución, persistencia y posibilidades de ser conjurados por agentes naturales con el paso del tiempo. La propuesta define a la compactación inducida como dos problemas:

1. Compactación superficial: disminución del volumen de macroporos producido dentro del horizonte arable anualmente (Ap).
2. Compactación subsuperficial: disminución del espacio poroso inducida por debajo del Ap por transmisión de las presiones que el rodado ejerce sobre el suelo.

La primera proviene de las labores posteriores a la labranza primaria y puede afectar a ese ciclo del cultivo. Con la nueva labor fundamental se restituirá el volumen de poros perdidos

en el ciclo debido a labranza y tránsito. En cambio la compactación subsuperficial tiene como gran desventaja la de ser acumulativa, ya que el ciclo de labores convencionales no involucra esos horizontes. Además, al ubicarse a mayor profundidad recibe mucho más atenuados los efectos de los agentes descompactadores naturales, tales como ciclos helada-descongelamiento, seca-humedad y la actividad biológica de raíces e insectos. La intervención del hombre para solucionarlas tendrá en cada caso unos costos muy diferentes.

Si bien Håkansson & Danfors (1981) avanzan en postular recomendaciones que limitan la carga por eje a 6 Mg y Smith & Dickson (1990) concluyen en la ya citada necesidad de reducir el peso total de los conjunto tractor-apero, hay que tener en cuenta que esto implica utilizar equipos más pequeños y por tanto la necesidad de aumentar el número de pasadas sobre cada hectárea de terreno a trabajar. Es decir que, a pesar de adoptar equipos más ligeros la intensidad de tráfico podría mantenerse. Bajaría el factor carga (Mg), pero aumentaría el factor distancia recorrida (km), o lo que es lo mismo a considerar: el número de pasadas para trabajar una hectárea.

Desde el punto de vista de estos autores, demasiado pocas comparaciones han sido hechas entre las alternativas convencionales que toda formación de conjuntos armónicos nos brinda: hacer la labor con un gran número de pasadas de un tractor pequeño, versus una reducción de rodadas pero con mayor carga por eje cada una. El trabajo incluye como consejo la necesidad de incrementar la investigación en estas dos alternativas y su relación con la compactación inducida, con la idea de hallar el punto de indiferencia donde pueda desaconsejarse una u otra.

Algunos investigadores se inclinan por tomar como variable independiente la presión en el área de contacto rueda/suelo y allí fijan los límites que evitan un deterioro de las condiciones físicas del subsuelo. Así Sánchez Girón (1996), recomienda para un número de pasadas del equipo comprendido entre 5 y 10 durante el ciclo vegetativo del cultivo, una presión superficial máxima de 80 kPa.

Por su lado Alakukku (1997), concluye que en condiciones de elevada humedad el tráfico debiera reducirse al mínimo indispensable y los vehículos debieran portar ruedas que les permitieran limitar su presión de inflado a una máxima de 50 kPa.

Han sido objetivos principales de este trabajo, tanto el discriminar la responsabilidad de las variables independientes, peso y número de pasadas, en la distribución vertical de la compactación inducida, como obtener evidencia que permita decidir la conveniencia entre conjuntos ligeros que ruedan muchas veces sobre la superficie trabajada, o conjuntos más grandes y pesados que resuelvan la tarea con menos pasajes.

Dos hipótesis de trabajo fueron contrastadas a partir del presente trabajo:

- 1) La compactación inducida al subsuelo por el tráfico vehicular depende del número de pasadas hechas sobre las mismas sendas, con independencia del peso sobre el eje.
- 2) A partir del tráfico reiterado, la profundidad del horizonte de suelo que se manifiesta con el mayor incremento de la resistencia a la penetración, tiene una relación inversa con el número de pasadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El diseño experimental incluye diferentes intensidades de tráfico, obtenidas a partir de la combinación de dos tratamientos que varían el factor peso total, seis subtratamientos que resultan de incorporar a cada tratamiento, tres alternativas de variación del factor número de pasadas, y por último una parcela testigo sin tráfico. El mismo ensayo se repitió, sobre la misma serie de suelo, dos años consecutivos.

Los vehículos

Se utilizaron como vehículos para aplicar los tratamientos de tráfico dos tractores agrícolas convencionales, de dos ruedas motrices y marchando en vacío sin apero, identificados como (L) el más ligero y (P) el más pesado.

Sus parámetros generales de identificación se exponen en la Tabla 1. En ambos tractores las huellas de las ruedas delanteras quedaban incluidas en la impronta de las traseras, coincidiendo sus planos medios.

Tabla 1. Principales parámetros de los tractores usados en los ensayos

Parámetro y Unidad	Tractor	
	Ligero (L)	Pesado (P)
Potencia en el motor (kW)	37	76
Masa total (Mg)	2,3	4,2
Peso sobre el eje trasero (kN)	15,7	26,5
Rodado tracción (diagonal)	12,4 - 36	18,4 - 34
Altura tacos ruedas motrices (mm)	40	40
Presión inflado ruedas motrices (kPa)	114	128
Área contacto rueda motriz/suelo (m ²)	0,111	0,182
Presión sobre terreno, ruedas motrices (kPa)	71	73
Carga sobre eje delantero (Mg)	0,7	1,4
Ruedas delanteras directrices (diagonales)	6,0 - 16	7,5 - 16
Presión de inflado ruedas delanteras (kPa)	180	210
Área contacto rueda delantera/suelo (m ²)	0,0335	0,0646
Presión sobre el terreno delantera (kPa)	96,5	107,0
Velocidad de avance (m s ⁻¹)	1,6	1,5
Vía (=trocha) (m)	2,1	2,1

El área real de contacto rueda/suelo fue medida en cada ensayo sobre el mismo terreno que luego se trafficaría, según método explicitado por Jorajuría et al. (1995).

El lugar

Los ensayos se realizaron en el límite sur de la subregión Pampa Ondulada, Provincia de Buenos Aires, Argentina, 34°55' S, 57°57' W, altitud 15 m.s.n.m., Estación Experimental Central de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la UNLP.

El suelo fue clasificado como un Argiudol típico, fina, illítica, térmica, (Soil Conservation Service, 1994), perteneciente a la serie Centeno, con un perfil que presentaba la siguiente secuencia: Horizonte A con un desarrollo de 170 mm, franco limoso (18% arcilla, 61% limo, 21% arena); 3,44% de materia orgánica. De allí y hasta los 600 mm de profundidad se encontraba un horizonte B textural, franco arcillo limoso (33% arcilla, 52% limo, 15% arena); 1,72% de materia orgánica.

Durante los tratamientos el suelo se encontraba consolidado habiendo recibido la última labranza dos años antes con arado de reja y vertedera a una profundidad de 150 mm. En el tapiz vegetal natural presente predominaba el Rye Grass anual (*Lolium multiflorum* Lam.) y el Trebol Blanco (*Trifolium repens* L.), cubriendo la superficie de las parcelas en un 90% y con una distribución altamente uniforme.

Se determinó en laboratorio la curva de compactación Proctor (Terzaghi & Peck, 1948), para tres intervalos de profundidad del perfil estudiado, para conocer la situación de compactabilidad del suelo que partíamos previa al tráfico y por otro lado conocer, para cada humedad con que se trabajó, la susceptibilidad a la compactación esperable para cada perfil, en función de la diferencia porcentual entre la humedad presente durante el tratamiento de tráfico y la que corresponde a la de máxima compactación evidenciada mediante el procedimiento Proctor.

Diseño experimental

Todos los ensayos tuvieron dos tratamientos Tractor Ligero (L) y Tractor Pesado (P), con tres subtratamientos totalizando seis parcelas experimentales de 4 x 25 m, cada ensayo, más las respectivas parcelas testigo sin tráfico. Las parcelas experimentales se distribuyeron dentro del lote en un diseño totalmente aleatorizado con tres repeticiones para cada oportunidad, totalizando para el conjunto de datos aquí analizados 36 parcelas con subtratamientos más las respectivas parcelas testigo sin tráfico, al cabo de los cuatro años.

Los subtratamientos correspondieron a tres diferentes intensidades de tráfico, simuladas en base a tres frecuencias de pasadas hechas sobre la misma senda: una, cinco y diez, más la parcela testigo. La Tabla 2 resume las intensidades de tráfico que corresponden a cada subtratamiento.

Tabla 2. Intensidades de tráfico (Mg km ha⁻¹) correspondientes a cada subtratamiento

Tratamiento	Subtratamiento Intensidad de Tráfico (Mg km ha ⁻¹)			
	0 pasadas (Testigo)	1 pasada	5 pasadas	10 pasadas
Ligero (L)	0	5,8	28,8	57,5
Pesado (P)	0	10,5	52,5	105

Variables experimentales y explicativas medidas

Las variables experimentales dependientes, que se vincularon a la compactación, que fueron medidas han sido:

A. Densidad aparente en seco (DA) y humedad actual determinada mediante sonda nuclear gammamétrica de geometría oblicua (Troxler 3440) cada dato promedio de tres repeticiones en los intervalos 0-150, 0-300 y 300-600 mm.

B. Resistencia a la penetración (RP) con penetrómetro electrónico con adquisidor de datos, medición de profundidad mediante ultrasonido (Agridry Rymick CP 20) bajo el estándar de ASAE S 313. (ASAE, 1992), cada dato promedio de 12 repeticiones a las profundidades de 0, 150, 300, 460, 530 y 600 mm.

Las variables explicativas medidas fueron:

C. Ensayo de compactación Proctor ASTM.D.698 T (Terzaghi & Peck, 1948).

D. Humedad actual del suelo en forma gravimétrica a los mismos rangos de medición de la sonda a efectos de contrastar comportamiento.

E. Rendimiento del pastizal en diferentes periodos de tiempo después de los tratamientos de tráfico expresado en materia seca (MS) por hectárea y en dos zonas para cada subtratamiento con tráfico:

Posición 1: Dentro de la huella dejada por el tráfico del tractor. Para ello se tomaron muestras al azar dentro de la impronta dejada por el tráfico, el terreno había sido clausurado a todo tráfico desde la aplicación de los tratamientos. Se utilizó un aro de una superficie de 0,25 m² y todo el pasto natural que era contenido dentro de su perímetro se lo cortaba a nivel del suelo, se lo introducía en bolsas de nylon.

Posición 2: La misma operatoria se usó para obtener muestras del área adyacente a la impronta dejada por el paso del tractor. En este caso las muestras se tomaban arrojando el aro a una distancia de un metro alternativamente a cada lado de la impronta derecha e izquierda.

Cada valor de rendimiento en MS es la media de cinco repeticiones para cada parcela, por tanto cada ensayo incluyó 105 muestras de pasto, totalizando 210 en los dos años consecutivos de ensayo. El pasto colocado en las bolsas de nylon era inmediatamente pesado en húmedo, para ser luego colocado en estufa a 105 °C hasta peso constante de las muestras.

Para comparar las medias de los subtratamientos se hizo un análisis de varianza seguido del método de Fischer. Luego de refutar la hipótesis de nulidad, probada la evidencia de que las variables se encuentran en alguna relación sistemática, se hizo un test de Duncan para verificar los niveles de las diferencias. Cada nivel de profundidad fue analizado separadamente y los subtratamientos comparados.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La oportunidad en que se relevaron los datos mecánicos del suelo fue en forma inmediata a los tratamientos, midiéndose densidad aparente y resistencia a la penetración en las dos oportunidades, resumidos respectivamente en las Tablas 3 y 4.

Tomando como base de discusión los datos de DA correspondientes al primer año (Tabla 3A) se aprecia que los subtratamientos con el tractor pesado causaron mayores incrementos ($p < 0,05$) en el rango 300-600 mm que los correspondientes al tractor ligero. No obstante los máximos incrementos de la DA para ambos tratamientos se registraron en el rango de 0-300 mm. En éste intervalo de profundidad fueron necesarios diez pasajes del tractor ligero para obtener similar incremento de la densidad aparente que sólo una del pesado ocasionó.

Tabla 3. Valores de densidad aparente (Mg m⁻³), medidos gammamétricamente, en tres rangos de profundidad, para los seis subtratamientos después del tráfico y la parcela testigo sin tráfico, para el primer ensayo

Prof. (mm)	Tratamientos						Testigo
	L1	P1	L5	P5	L10	P10	
A. HP media en el perfil: 36%							
0 – 150	0,775 B	0,732 A	0,726 A	0,777 B	0,869 C	0,742 A	0,707 A
0 – 300	1,156 C	1,111 B	1,191 C	1,169 C	1,198 C	1,184 C	0,810 A
300 – 600	1,182 B	1,224 C	1,220 C	1,235 C	1,223 C	1,274 D	0,998 A
B. HP media em el perfil : 30%							
0 – 150	0,776 B	0,740 C	0,735 C	0,778 B	0,845 D	0,744 C	0,705 A
0 – 300	1,056 B	1,087 B	1,065 B	1,123 B	1,094 B	1,130 B	0,795 A
300 – 600	1,167 B	1,352 C	1,180 B	1,202 B	1,323 C	1,494 D	0,980 A

L y P = Ligero y Pesado, 1, 5, y 10 = número de pasadas

* Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para el test de Duncan entre tratamientos y de cada uno con la parcela testigo sin tráfico

Tabla 4. Valores de la resistencia a la penetración-RP (kPa) para cada parcela, a los seis niveles de profundidad, evaluados inmediatamente después del tráfico en el primer ensayo

Prof. (mm)	Tratamientos *						Testigo
	L1	P1	L5	P5	L10	P10	
A. HP media del perfil: 36%							
0	155 A	98 B	109 B	111 B	68 C	60 C	153 A
150	479 A	364 B	295 C	300 C	453 A	289 C	489 A
300	901 B	562 A	763 B	781 B	863 B	1083 C	552 A
460	1665 C	1020 A	1130 B	1368 C	1396 C	1498 C	857 A
530	1485 B	1622 B	1518 B	2029 D	1623 BC	1767 C	997 A
600	1447 B	1827 D	1672 C	1988 D	1897 D	2182 C	1202 A
B. HP media del perfil: 30%							
0	540 B	552 B	591 C	613 C	602 C	610 C	459 A
150	733 B	782 B	879 C	880 C	1010 D	1020 D	490 A
300	900 A	968 B	976 B	986 B	1180 C	1173 C	828 A
460	1373 B	1899 C	2060 D	2190 C	2266 C	2410 F	1071 A
530	1736 B	1994 C	1908 C	2434 D	1927 C	2530 D	1246 A
600	1680 B	2193 C	1670 B	2385 D	2170 C	2618 E	1442 A

La última columna muestra las medias de RP de las parcelas testigo, L y P = Ligero y Pesado, 1, 5, y 10 = número de pasadas

* Letras distintas indican diferencias estadísticas altamente significativas ($p < 0,01$) para el test de Duncan entre tratamientos y de cada uno con la parcela testigo sin tráfico

Esto evidenciaría en principio que un alto número de pasadas con un tractor ligero podría inducir similares valores de compactación a similares profundidades que menos pasadas de uno pesado, resultado que hasta el presente no se ha visto destacado en trabajos anteriores revisados.

En cambio al considerar los resultados del año siguiente, (Tabla 3B), al considerar el nivel subsuperficial, 0-300 y 300-600 mm, se aprecia que en la segunda intensidad de tráfico (5 pasadas) no hubo diferencias en los incrementos inducidos en la DA entre ambos tractores. En cambio al tomar las dos intensidades extremas, 1 y 10 sí se encuentran diferencias ($p < 0,05$), allí siempre el tractor pesado indujo mayores valores de DA. Por lo tanto este comportamiento sí coincide y avala al descrito por Smith & Dickson (1990) y Taylor et al. (1982), respecto a la responsabilidad del peso en la compactación inducida subsuperficialmente.

No obstante la responsabilidad que el tractor ligero con alto número de pasadas mostró, en el aumento de la densidad aparente a niveles de la mayor profundidad considerada (300 a 600 mm), cuando los horizontes más superficiales son considerados (0-300 mm), algo más del 90% del incremento máximo medido para la densidad aparente se produjo ya en la primer pasada.

Por otro lado los datos relevados de resistencia a la penetración para el tractor ligero en el primer ensayo (Tabla 4A) ratifican lo anterior si consideramos los incrementos de la RP para los niveles de 300 y 530 mm de profundidad. En esos valores de profundidad pasar una, cinco o diez veces fue indiferente, ya que con la primera se logra un incremento de la impedancia que luego no se modifica estadísticamente ($p < 0,05$) y se mantiene a pesar del mayor número de pasadas.

Diferente fue la respuesta del suelo al tránsito en el ensayo del segundo año, si lo analizamos desde los datos de RP, ya que sólo a la mayor profundidad (600 mm) fue lo mismo traficar una que cinco veces. Recién con diez pasadas la impedancia en ese horizonte se incrementa significativamente (Tabla 4B). En los horizontes superiores hubo un crecimiento de la impedancia con el número de pasadas siempre.

Si buscamos una corroboración de estas inferencias en la evolución de la DA también la encontraremos (Tabla 3B), ya que en el rango 300 a 600 mm, sólo con diez pasadas, el tractor ligero modificó la densidad aparente lograda con la primer pasada y que se había mantenido igual luego de las cinco pasadas. Este es otro aval para la primera hipótesis planteada, ya que la compactación inducida en profundidad se la pudo vincular a las pasadas reiteradas, con independencia del peso sobre el eje.

Hasta aquí los resultados en base a la variable experimental DA podrían avalar sólo parcialmente el comportamiento del suelo a nivel subsuperficial descrito por Smith & Dickson (1990). En cambio el panorama se aclara bastante al considerar la variable experimental resistencia a la penetración (RP) mostrados en las Tablas 4A e B.

Las Tablas 4A e B muestran respectivamente para los dos años los valores de RP para cada uno de los subtratamientos en cada profundidad y la situación original del suelo antes del tráfico expresados en la columna de la parcela testigo sin tráfico. Cada dato de RP es el promedio de 36 repeticiones; esto surge de tomar 12 evaluaciones por parcela y tener tres repeticiones

cada subtratamiento. Estos datos fueron tomados con un coeficiente de variación (CV) de 22% para los horizontes de mayor profundidad, ascendiendo a 36% para el nivel más superficial (0 a 150 mm).

Si nos centramos en el primer ensayo puede verse que los datos de la Tabla 4A, reflejan el comportamiento de un suelo con elevada humedad. La humedad presente a la hora de hacer los tratamientos de tráfico era de 36%; esto significa 0,5% por encima de la capacidad de campo. En tales condiciones el suelo presentó una muy escasa capacidad portante, lo que favoreció la formación de una huella considerable y la circulación de los tractores con valores de resbalamiento del orden de 12 a 22% según subtratamiento. Al traficar de esa manera el suelo dentro de la huella se colapsó y recibió con las consecutivas pasadas un amasado. Ese tratamiento motivó una considerable compactación, corroborable a través del incremento de la densidad aparente a ese nivel.

Sin embargo ese amasado de un suelo de textura fina, sin que mediara tiempo para el secado produce un aumento de la humedad volumétrica. Este incremento del porcentaje de agua en relación al nuevo volumen genera condiciones de mayor lubricación en el momento de ingresar el penetrometro de cono. Por lo tanto dentro del suelo removido correspondiente a la profundidad de la huella el valor de resistencia a la penetración medido después del tráfico fue menor. En este intervalo de profundidad el valor de la RP mantuvo entonces una relación inversa con el de la DA medida.

Las profundidades de las huellas medidas en función del hundimiento del rodado estuvieron en relación directa a la intensidad de tráfico y fueron: 40 mm para L1, 60 mm para H1, 150 mm para L5, 200 mm para H5, 250 mm para L10 y 300 mm para H10.

Tomando ahora como base de discusión los datos de penetrometría del segundo ensayo (Tabla 4B) puede fácilmente apreciarse que todos los subtratamientos y a todas las profundidades evaluadas, tuvieron un incremento altamente significativo ($p < 0,01$) en el valor de RP, con respecto a la situación antes del tráfico. La única excepción la constituyó el subtratamiento L1 a la profundidad de 300 mm. Desde la superficie y hasta los 300 mm de profundidad todos los subtratamientos, no sólo tuvieron un incremento altamente significativo de la RP, sino que también no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos pesado (P) y ligero (L). Las únicas excepciones la constituyeron los subtratamientos L1 y H1 a 300 mm de profundidad, adonde el tractor pesado produjo un significativo incremento en la RP comparado al ligero.

En el mismo horizonte que está siendo considerado, 0 a 300 mm, los valores de DA también tuvieron un significativo incremento después del tráfico para todos los subtratamientos comparado con la condición del suelo testigo (Tabla 3B). Sin embargo en este nivel no se diferenciaron los tratamientos L y P.

En virtud de lo antecedente para este rango de profundidad podría establecerse:

1. El suelo respondió a los subtratamientos con un significativo aumento no sólo de la resistencia a la penetración, sino también, de su densidad aparente.
2. Tendríamos entonces antecedentes suficientes como para considerar que a este nivel el suelo ha modificado las

variables experimentales medidas en base a la deformación del suelo, con la consecuente desaparición de espacio poroso, por tanto puede considerarse a la variable respuesta compactación como positiva.

3. Estos incrementos en la compactación del suelo no fueron fuertemente dependientes de la carga sobre las ruedas.

Atendiendo a que ambos tractores tenían la misma presión superficial en la interfase rueda/suelo, podemos coincidir con Smith & Dickson (1990) y Håkansson (1994) en la responsabilidad directa de la presión sobre el suelo en la compactación superficial del suelo traficado, aportando de esta manera un aval para avanzar en la consideración de aceptar la tercera hipótesis de trabajo planteada.

Lo anterior se estableció promediando desde la superficie hasta los 300 mm de profundidad. Si se considera sólo el rango de 0 a 150 mm, se encuentran diferencias entre los tratamientos ligero y pesado, pero el horizonte con el mayor incremento en las variables experimentales asociadas a la compactación, fue el del rango de 150 a 300 mm (Tablas 3B y 4B).

Si consideramos horizontes más profundos, 460 a 600 mm, la RP (Tabla 4B), inducida por los tratamientos con el tractor pesado (P), fueron siempre mayores que los correspondientes al tractor ligero (L).

Esto concuerda con los ya citados Smith & Dickson (1990) y Håkansson (1994), respecto a la responsabilidad del peso sobre las ruedas en la inducción de compactación a niveles subsuperficiales y aporta avales para la cuarta hipótesis planteada.

Sin embargo, estas inferencias no son absolutamente corroboradas por los datos de densidad aparente que se muestran en la Tabla 3B. En el rango de profundidad de 300 a 600 mm, en la segunda intensidad de tráfico (L5 y P5), no existen diferencias entre tratamientos. Es decir el pasaje de uno u otro tractor tuvo la misma responsabilidad en la compactación para esa intensidad de tráfico.

Si para el mismo grupo de datos focalizamos el análisis desde la consideración de las intensidades de tráfico, se pueden comparar, por similitud, los subtratamientos L10 con 57,5 Mg km ha⁻¹ con el P5 con 52,5 Mg km ha⁻¹. Sin embargo, los datos recogidos son suficientemente convincentes como para concluir que considerando los horizontes más profundos estudiados, 530-600 mm, se encuentran similares valores de compactación inducida por diez pasadas del tractor ligero (L10) y sólo una pasada del tractor pesado (P1).

En la Tabla 4B, puede apreciarse que a las profundidades de 530 y 600 mm, la RP medida después del tráfico, es la misma para los subtratamientos P1 y L10.

Esto suma un importante aval para la primera hipótesis, por la coincidencia de ambas variables experimentales vinculadas a la compactación, mostrando que un elevado número de pasadas con un tractor, aunque ligero, puede ocasionar similares magnitudes de compactación en profundidad que uno pesado.

Estos resultados, si bien no contradicen los antecedentes de Håkansson & Reeder (1994), pues también este ensayo demostró un incremento de la compactación superficial con el aumento del número de pasadas para el tractor ligero, sí aportan conocimientos que no manejábamos hasta el presente referidos a la responsabilidad que un tractor, aunque de poco peso, pero

con al menos diez pasadas consecutivas en la misma senda, puede tener en la inducción de compactación a niveles subsuperficiales.

Por lo tanto el presente aporte, en todo caso, empeora el panorama descrito por los citados investigadores suecos, toda vez que si se llega al número de diez pasajes consecutivos, la inducción de compactaciones ya puede considerarse acumulativa, porque interesa horizontes por debajo del arable convencionalmente.

Por otro lado, la evaluación de la producción de los pastos naturales, ocho meses después de instalados los tratamientos, en las parcelas sin tráfico y en la de cada subtratamiento para el primer ensayo, se muestra en la Figura 1, y expone las disminuciones porcentuales de la producción, medidas siempre en términos de materia seca por hectárea, dentro de la huella.

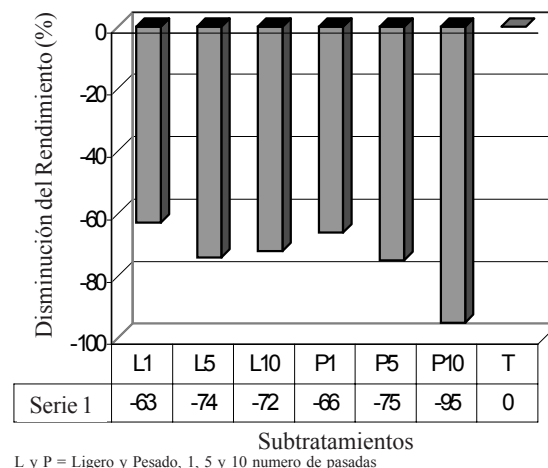


Figura 1. Disminución del rendimiento del pastizal respecto al testigo sin tráfico, evaluado ocho meses después del tráfico, dentro de la huella dejada por el tractor, para el ensayo instalado en 1994

A su vez, la Figura 2, muestra la evaluación del pastizal en las zonas adyacentes a la impronta de las huellas dejadas por el tractor. El objetivo aquí fue tener una cuantificación de la afectación, ya no en vertical sino en horizontal, de la compactación inducida por el tráfico. Para ello se tomaron las muestras a un metro de la impronta de las huellas, alternando la medición a la izquierda y derecha. Tanto los datos de la evaluación dentro de la huella, como fuera de la huella fueron comparados con las parcelas testigo sin tráfico y los datos de disminución de la producción de pasto medidos en % de materia seca por hectárea están expuestos en las Figuras 1 y 2 respectivamente.

Las parcelas testigo sin tráfico tuvieron una media de rendimiento de 3,65 Mg ha⁻¹ expresado en materia seca. El rendimiento del pastizal evaluado ocho meses después del tráfico dentro de la impronta dejada por el pasaje de las ruedas mostró una disminución promedio de 74% respecto al testigo no traficado. En esta evaluación y en el caso del subtratamiento P10 dentro de la huella, el pasto había prácticamente desaparecido, no mostrando regeneración aún ocho meses después al momento de ésta evaluación.

Luego, y en orden de importancia, la disminución de rendimiento siguiente la mostraron los subtratamientos P5 y

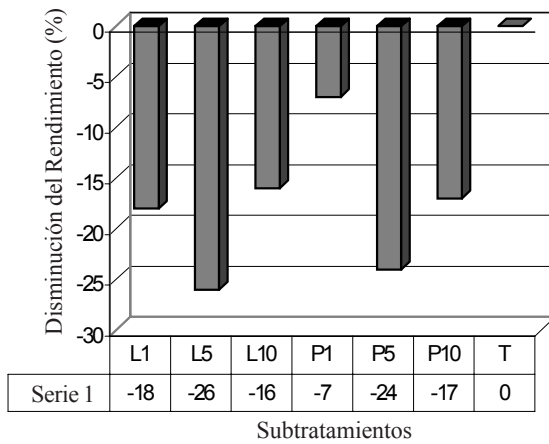


Figura 2. Disminución del rendimiento del pastizal respecto al testigo sin tráfico, evaluado ocho meses después del tráfico adyacente a la huella dejada por el tractor, para el ensayo instalado en 1994

L5, sin diferencias estadísticas entre ellos. Esto significa que a pesar de corresponder al subtratamiento P5 una intensidad de tráfico que casi duplica a la de L5, el daño producido al pastizal en la huella fue el mismo. Esto muestra a esta variable más dependiente del número de pasadas que del peso, dentro de los factores que conforman la intensidad de tráfico. Para las menores intensidades de tráfico, L1=5,8 y P1=10,5 Mg km ha⁻¹ este comportamiento se repite, ya que ambos subtratamientos mostraron diferencias significativas de rendimiento respecto al testigo, pero no entre ellos.

Finalmente al considerar a las mayores intensidades L10=57,5 y P10=105 Mg km ha⁻¹, las diferencias entre el tractor pesado y el ligero fueron altamente significativas ($p < 0,01$). Es decir que si el número de pasadas debe elevarse a diez, será muy diferente el daño si lo hacemos con el tractor ligero que con el pesado. Esto significa que diez pasadas del tractor ligero, a pesar de haber inducido similares valores de compactación en profundidad que el pesado, no tuvieron, en el término de los ocho meses desde el tráfico, igual respuesta en lo que a perjuicio a la producción de pasto se refiere.

Tomando como base de análisis la Figura 2, que recoge los datos de producción de pasto evaluados en las adyacencias de las huellas, donde la merma de rendimiento promedió un 18%, puede verse una situación idéntica a la descrita para los resultados dentro de la huella si consideramos los subtratamientos L5 y P5, pues acusan una caída del rendimiento altamente significativa ($p < 0,01$) respecto al testigo, pero no existen diferencias estadísticas entre ellos. Además estos subtratamientos de cinco pasadas ocasionaron el mayor perjuicio a la producción de pasto, evaluada en este sector.

Otro en cambio ha sido el comportamiento del pasto en adyacencias a las huellas para los de mayor intensidad de tráfico. Ahora sí, aquellos similares valores de compactación inducida parecen evidenciar mermas de rendimiento similares ya que no existen diferencias estadísticas para las medias de rendimiento entre los subtratamientos L10 y P10. Por lo tanto podría establecerse que diez pasadas del tractor ligero ocasionaron tanto perjuicio como diez pasadas del pesado al considerar el sector adyacente a las huellas.

A modo de balance, podría establecerse para las condiciones de ensayo, que fueron: suelo de textura fina y alta humedad presente, con alrededor de 72 kPa de presión sobre el suelo de las ruedas traseras, con 2,3 y 4,2 Mg sobre su eje, respectivamente, que el suelo fue severamente compactado en la profundidad descrita como subsuperficial, es decir por debajo del horizonte arable convencionalmente. Estos resultados indican que la compactación del subsuelo en este sistema puede inducirse por el tráfico de vehículos con mucha menos carga por eje que los 6 Mg recomendados por Håkansson & Danfors (1981) como límite para evitar la inducción de compactaciones acumulables. Estas recomendaciones deben estar estrictamente vinculadas a la profundidad de arada normal en el sistema tratado.

CONCLUSIONES

1. El número de pasadas reiteradas sobre la misma senda puede emular, e incluso reemplazar, al factor peso sobre el eje, en la responsabilidad principal de inducir compactaciones en el subsuelo.
2. Diez pasadas es el número crítico de rodadas, pues se pierden las ventajas de traficar con un tractor ligero, como alternativa a uno pesado pero con menos pasadas.
3. La resistencia a la penetración es un parámetro más sensible para evaluar la reacción del suelo al tráfico, que la densidad aparente.
4. El peso en el eje tiene una relación directa con la compactación inducida a horizontes subsuperficiales del suelo, a pesar que el valor de la presión superficial en el área de contacto rueda-suelo sea el mismo.
5. La profundidad del horizonte del suelo sometido a tráfico reiterado que reacciona con un mayor incremento de la resistencia a la penetración, tiende a hacerse más superficial, según se incrementa el número de pasadas.
6. La producción del pastizal es afectada por el tráfico, no sólo dentro de la huella dejada por las ruedas, sino también en la zona inmediata adyacente a la misma.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAKUKKU, L.; Long-term soil compaction due to high axle load traffic. Jokioinen, Finland: Agricultural Research Centre of Finland. 1997. 55p.
- ASAE - American Society of Agricultural Engineering. Standards. St. Joseph, MI, USA: ASAE Editions, 1992, 781p.
- CARPENTER, T.; FAUSEY, N. Tyre sizing for minimizing subsoil compaction. St. Joseph, MI, USA: ASAE. 1983. Paper 83-1058
- DRAGHI, L.M.; JORAJURÍA, D.; BALBUENA, R.H. La compactación superficial y subsuperficial de un perfil debida al tráfico repetido. Rivista di Ingegneria Agraria (Italia) v.20, n.2, p.93-98, mar. 1989.
- HÅKANSSON, I Subsoil compaction caused by heavy vehicles. A long-term threat to soil productivity. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v.29, p.105-110, 1994.
- HÅKANSSON, I.; DANFORS, B. Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: INTERNATIONAL CONFERENCE OF ISTVS, 7. NH, USA: Hanoover, 1981.

- HÅKANSSON, I.; REEDER, R.C. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. Soil and Tillage Research, Amsterdam, v.29, p.277-304, 1994.
- JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L.; ARAGÓN A. Compactación del suelo bajo tráfico repetido. Investigación Agraria, Prod. Prot. Veg., v.10, n.3, p.473-483, 1995.
- JORAJURÍA, D.; DRAGHI, L.M.; ARAGÓN, A. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* grassland. Soil & Tillage Research, Amsterdam, v.41, p.1-12, 1997.
- SÁNCHEZ-GIRÓN RENEDO, V. Dinámica y mecánica de suelos. Madrid, España: Agrotécnicas, 1996. 426p.
- SMITH, H.; DICKSON, L. The contribution of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. Journal of Agricultural Engineering Research, London, v.46, p.13-29, 1990.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. Keys to soil taxonomy. 6th Ed, Soil Survey Staff, USDA, Washington D.C., 1994.
- TERZAGHI, K.; PECK, R.B. Soil mechanics in engineering practice. USA: Ed. Illuse, 1948. 566p.