

EFECTO DE LA DESCOMPACTACIÓN DEL SUELO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y EL RENDIMIENTO DE TRIGO Y SOJA

HORACIO OMAR IMVINKELRIED^{1*}; MARIANELA PIETROBÓN¹;
IGNACIO DELLAFERRERA¹⁻²; SILVIA IMHOFF¹⁻²

Recibido: 24/4/2018

Recibido con revisiones: 29/10/2018

Aceptado: 29/10/2018

RESUMEN

La degradación de los suelos de la región centro-norte de la provincia de Santa Fe y la consecuente pérdida de productividad de los sistemas agrícolas se atribuye a dos factores principales: la compactación -producida por el laboreo y tránsito de la maquinaria- y la pérdida de fertilidad química. Las prácticas tecnológicas de descompactación del suelo y fertilización estratégica han sido propuestas para revertir esos problemas, aumentando la producción de materia seca y el rendimiento. El objetivo general fue evaluar los cambios producidos en la calidad física del suelo y el rendimiento logrado en la secuencia soja-trigo durante 3 años (2008/2009 -C1-, 2009/2010 -C2- y 2010/2011 -C3-), en condiciones de campo con dos tratamientos: descompactado (d) y sin descompactar (sd) sobre un Argiudol ácuico de Esperanza (Provincia de Santa Fe, Argentina). El diseño experimental fue en bloques completos aleatorizados y tres repeticiones. Se diferenciaron distintos escenarios desde el punto de vista hídrico; donde se podrían mencionar como: (i) C1 muy seca para soja y seca para trigo; (ii) C2 húmeda para soja y con buena reserva de agua en el suelo para el trigo; (iii) C3 moderadamente seca para soja y húmeda para trigo. Los resultados obtenidos indican la persistencia del efecto residual positivo de la descompactación inicial sobre la resistencia mecánica (RP) y porosidad de aireación del suelo (Pa) luego de 3 años de realizada la labor. Los tratamientos sd mostraron una tendencia de mejora subsuperficial en los valores de densidad aparente (Ds) y RP, lo que podría deberse al efecto de las raíces del cultivo de trigo sobre el suelo en la secuencia soja-trigo. Los rendimientos logrados mejoraron en las condiciones d. La campaña influyó marcadamente sobre el rendimiento de los cultivos en secano.

Palabras clave: Densidad de suelo (Ds), resistencia a la penetración (RP), porosidad de aireación (Pa).

EFFECT OF SOIL DECOMPACTION ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND YIELD OF WHEAT AND SOYBEAN CROP

SUMMARY

Soils degradation in central-north region of Santa Fe province and the consequent loss of productivity of the agricultural systems is attributed to two main factors: soil compaction due to tillage and machinery traffic, and loss of chemical fertility. The technological practices of decompaction and fertilization has been propoused to reverse these problems, to increase the resources use efficiency and, consequence, the dry matter production and crop yields. The aim o of this study was to evaluate changes produced in the physical quality of the soil and the yield achieved in the sequence soybean-wheat during the growing seasons 2008/2009 (GS1), 2009/2010 (GS2) and 2010/2011 (GS3) in field conditions with two levels of compaction (decompacted 'd' and without decompacted 'wd') on a soil aquic argiudol in Esperanza (Santa Fe province, Argentina). The experimental design was in randomized complete blocks and three repetitions. Different scenarios differed from the view point of water; where they could be mentioned as: (i) GS1 for very dry to dry soybeans and wheat; (ii) GS2 wet for soybeans and good water reserve in the soil for wheat; (iii) GS3 moderately dry to wet to soybeans and wheat. The results indicate the persistence of the residual positive effect of the initial decompaction on soil resistance penetration (SR) and soil aeration porosity (Ap) after 3 years of work. The treatments -wd- showed a tendency of subsurface improvement in the values soil bulk density (Bd) and SR, which could be due to the effect of the roots of the wheat crop on the soil in the wheat / soybean sequence. The achieved yields improved under conditions d. The year strongly influenced the yield of rainfed crops.

Key words: Soil bulk density (Bd), soil resistance penetration (RP), soil aeration porosity (Ap).

1 Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Litoral

2 CONICET

*Autor de contacto: horaim@fca.unl.edu.ar

INTRODUCCIÓN

La producción vegetal es el resultado de la interacción entre el potencial genético y el ambiente, entendiendo éste como el conjunto de factores relacionados al clima, suelo y acción del hombre (manejo). El desafío de hoy es mejorar el ambiente permitiendo la expresión del potencial genético de los cultivos, para aumentar el rendimiento de cultivos producido con el menor impacto ambiental posible, ya sea en términos de deterioro de la calidad del recurso suelo (degradación físico-química) o de la atmósfera (aumento de la emisión de gases de efecto invernadero, reducción en la captura de carbono, balances negativos de nutrientes, etc.).

En general, se acepta que el deterioro químico del suelo puede resolverse con prácticas adecuadas de fertilización, mientras que el deterioro físico no está debidamente solucionado. Se sabe que dentro de estas limitantes físicas la compactación del suelo es un problema que se puede intensificar por el sistema de labranza, el tránsito de la maquinaria, el pisoteo de los animales y el fuego (Jorajuría & Draghi, 1997; Botta *et al.*, 2006) afectando la porosidad de aireación (Pa), la densidad del suelo (Ds), la resistencia mecánica a la penetración (RP), la conductibilidad hidráulica y la infiltración del agua, entre otros (Pilatti *et al.*, 2006; Ghiberto *et al.*, 2007). Estas propiedades impactan directa e indirectamente sobre el crecimiento de las plantas y, como consecuencia, sobre la productividad y eficiencia de uso de los recursos agua, radiación y nutrientes. A pesar de que existen algunas opciones de manejo, tales como incluir gramíneas en las rotaciones, aumentar el contenido de materia orgánica, tránsito controlado, control presión de neumáticos, la descompactación mecánica entre otras, se requiere mayor estudio para la región.

La degradación de los suelos es actualmente uno de los principales problemas del mundo, comprometiendo el mantenimiento y aumento de la productividad agropecuaria (Hakansson & Voorhees, 1998). En Argentina, en las dos últimas décadas, se produjo una simplificación de los sistemas de producción con predominio del monocultivo de soja. Esto trajo como resultado, principalmente en la región pampeana, una dis-

minución de la superficie cultivada con praderas y un incremento del área dedicada a cultivos agrícolas anuales (Ferrerías *et al.*, 2001). Estos sistemas son más proclives a causar un rápido deterioro principalmente en suelos limosos, por la forma y origen de las partículas de limo, principalmente fitolitos (Cosentino & Pecorari, 2002). Este material se asoció a la inestabilidad estructural de los Argiudoles (Sasal *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008).

La remoción mecánica de capas compactadas mediante el uso de implementos descompactadores o escarificadores (e.g. paratill, paraplow) ha tomado creciente difusión en el mundo (Hamza & Anderson, 2005; Spoor, 2006). En nuestro país la experiencia es más limitada; se suelen mostrar descensos significativos de la resistencia del suelo a causa de la descompactación, pero se sabe poco acerca de su perdurabilidad y sobre su impacto sobre el rendimiento de los cultivos.

En función de lo mencionado, se planteó como objetivo evaluar el efecto de dos niveles de compactación inicial del suelo sobre las propiedades físicas del mismo y el rendimiento de los cultivos de trigo (T) y soja (S) en la secuencia S-T/S-T/S-T durante tres campañas. Las variables físicas de suelo medidas fueron, densidad aparente (Ds), resistencia mecánica a la penetración (RP) y porosidad de aireación (Pa).

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño experimental

El experimento se realizó en la Unidad Experimental de Cultivos Extensivos ubicado en Esperanza (Santa Fe) sobre RP N° 70, km 26, sobre la secuencia de cultivos S-T/S-T/S-T durante las campañas 2008/2009 (C1), 2009/2010 (C2) y 2010/2011(C3). El suelo está clasificado como Argiudol ácuico (fina-media-térmica), serie Humboldt, con un índice de productividad de IP= 66. Se trata de un suelo profundo, moderadamente a bien drenado, en el cual la fracción (arcilla+limo) < 0,50 μ representó el 89% y la fracción arena > 0,50 μ el 9,8% de la granulometría con un 2,3% de materia orgánica en los 10 cm de profundidad.

Se seleccionó un lote agrícola según historia de manejo previa con 6 años en siembra directa (SD) y monocultivo de soja proveniente de campo natural de una superficie de 5 ha con presencia de compactación, que fue determinada midiendo la RP con un penetrómetro de golpe a campo con un área de cono de 20,24 cm² y distancia de golpe de 50 cm, a la profundidad de 0-20 cm en condiciones de humedad próxima a capacidad de campo, obteniendo un valor promedio de 2,3 MPa, adoptándose como valor crítico próximo a 2,5 MPa (Gupta & Allmaras, 1987; Glinski & Lipiec, 1990). El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones. Cada tratamiento surgió de la combinación de dos niveles de compactación (sin descompactar y descompactado). El tamaño de cada parcela fue de 6 m de ancho por 20 m de largo. En las parcelas descompactadas se realizó una labor profunda vertical al inicio del ensayo (mayo de 2008) con el objetivo de disminuir la compactación. Para ello se utilizó un paratill marca Dolbi a 70 cm entre púas, con una profundidad de labor de 30-35 cm. La humedad de suelo al momento de realizar dicha labor fue de 0,32 cm³ cm⁻³, inferior a la capacidad de campo (0,36 cm³ cm⁻³). Luego de 7 meses de realizada la mencionada labor se procedió a la siembra del primer cultivo de la rotación estudiada que corresponde a una soja, con el sistema de siembra directa.

Se sembró el cultivar de soja RA 725, grupo de madurez VII, de hábito de crecimiento determinado, con una sembradora experimental de grano grueso de dos surcos marca ERCA. Las fechas de siembras fueron 4 de diciembre 2008, 5 de diciembre de 2009 y 6 de diciembre de 2010 para las campañas de soja (CS) CS1, CS2 y CS3, respectivamente. El espaciamiento entre hileras fue de 52 cm con una densidad de 26 semillas m⁻². En cuanto al cultivo de trigo se utilizó la variedad Buck Malevo, de ciclo largo, a 17,5 cm entre líneas, a razón de 120 kg de semillas ha⁻¹ con el objetivo de obtener 280 plantas m⁻². Las fechas de siembra fueron 3 de junio 2009, 11 de junio 2010 y 16 de junio 2011 para las campañas de trigo (CT) CT1, CT2 y CT3, respectivamente. Se mantuvieron los cultivos libre de malezas,

plagas y enfermedades. En base a los resultados de los análisis químicos del suelo, se realizó una fertilización fosforada del cultivo de soja y nitrogenada en trigo. En soja se consideró un criterio de suficiencia o de "arranque" (Rubio *et al.*, 2008). El fertilizante utilizado fue superfosfato triple de Ca -SPT- [20% P (46% P₂O₅) – 13% Ca (CaO)]. Se fertilizó en la CS1, CS2 y CS3 con 80 kg ha⁻¹ de fertilizante (SPT), aportando 16 kg ha⁻¹ de P. En trigo la fertilización nitrogenada se realizó a la siembra, según el método de balance de N, el fertilizante empleado fue urea (46-0-0) aplicando 46 kg ha⁻¹ de N para las CT1, CT2 y CT3.

Determinaciones físicas del suelo

En noviembre de 2008, a seis meses de realizada la labor con paratill, de cada repetición según tratamiento se colectaron 10 muestras de suelo con estructura no perturbada (cilindros) a dos profundidades (0-7 cm y 8-13 cm) para determinar la RP, la Ds y la Pa. Las muestras se saturaron por elevación gradual de una lámina de agua, se pesaron para obtener el contenido hídrico en saturación (θ_s) y posteriormente se equilibraron a diferentes potenciales mátricos en mesa de tensión por medio de presiones aplicadas en placas porosas (Klute, 1986). Cuando las muestras llegaron al equilibrio se pesaron y en cada una se midió la RP del suelo con penetrómetro electrónico, con cono de 60° de ángulo y 4 mm de diámetro basal. La velocidad de penetración fue de 1 cm min⁻¹ y la frecuencia de muestreo correspondió al registro de un valor de resistencia cada 0,67 segundos. Las lecturas obtenidas de cada muestra se promediaron para obtener un único valor de RP.

La densidad aparente del suelo se determinó al inicio y final de cada cultivo en la secuencia, para cada tratamiento y repetición, tomando tres muestras de suelo no perturbadas distribuidas aleatoriamente (cilindros) a dos profundidades (0-7 cm y 8-13 cm). Estas muestras se secaron en estufa a 105 °C hasta alcanzar peso constante y, a partir de la masa seca de suelo y del volumen del cilindro se determinó la densidad aparente del suelo (Blake & Hartge, 1986).

A través de la relación funcional propuesta por Busscher (1990) se obtuvieron los valores estimados de RP en el tiempo, según: $RP = a * \Theta^b * Ds^c$; donde: RP= resistencia del suelo a la penetración (MPa), Θ = contenido volumétrico de agua ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), Ds= densidad del suelo (g cm^{-3}) y 'a', 'b', 'c' son los parámetros del ajuste cuyos valores son para los tratamientos descompactados de 0,0156;-2,5269 y 5,6700 $r^2 = 0,88$ a nivel superficial; 0,0212;-2,3844 y 5,6382 $r^2 = 0,80$ a nivel subsuperficial y para los sin descompactar de 0,2274;-1,1692 y 2,9330 $r^2 = 0,84$ a nivel superficial; 0,0303;-2,7443 y 3,9934 $r^2 = 0,88$ a nivel subsuperficial respectivamente.

La porosidad total se estimó según la relación $PT = (1 - Ds/Dp) * 100$; siendo: PT= porosidad total, Ds= densidad del suelo (g cm^{-3}) y Dp= densidad de partícula (2,58 g cm^{-3} para el suelo en estudio). La porosidad de aireación (Pa, en %) se calculó $Pa = (PT - \Theta_{cc}) * 100$; donde Pa= porosidad de aireación (%), PT= porosidad total ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) y Θ_{cc} = contenido volumétrico de agua a capacidad de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$).

DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO

En madurez fisiológica se determinó el rendimiento. Se realizaron dos submuestras por repetición de 2 m cada una (aproximadamente una superficie de 2 m^2 y 0,7 m^2 para soja y trigo, respectivamente). Se secaron en estufa con circulación de aire forzado a 65 °C hasta peso constante. Se trillaron a mano y se determinó el rendimiento y sus componentes, número de granos m^{-2} ($N^{\circ}G \text{ m}^{-2}$), peso de mil granos (P1000, en g) y espigas por m^2 en trigo ($E \text{ m}^{-2}$). El rendimiento en soja fue corregido al 13,5% de humedad y en trigo al 14% de humedad.

Análisis estadístico

En el análisis estadístico se realizó con el software InfoStat/Profesional, versión 2008. Los datos de las variables de cultivo y de suelo se evaluaron mediante ANOVA, las medias se compararon según el test de mínima diferencia significativa (LSD, según sus siglas en inglés), con un nivel de significancia del 5% ($P \leq 0,05$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización agrometeorológica

Las precipitaciones (Pp) y temperaturas medias (T) que caracterizaron cada una de las campañas se encuentran detalladas en la **Figura 1**. Si se comparan las lluvias registradas desde un mes antes de la siembra (Pp acumulada) y durante el ciclo del cultivo con respecto a la media de los últimos 15 años (Pp_H); durante el cultivo de soja, se dieron distintos escenarios: i) CS1 (2008/09): muy seca; ii) CS2 (2009/10): muy húmeda; iii) CS3 (2010/11): normal (moderadamente seca). Considerando desde diciembre hasta abril, hubo -34, +50 y +8% de diferencia en la Pp acumulada vs. la Pp_H en la zona. Para el ciclo del cultivo de trigo, considerando desde mayo a noviembre, los escenarios fueron: i) CT1 (2009): +9%; ii) CT2 (2010): -47%; iii) CT3 (2011): +17% con respecto de la media histórica.

En soja, el déficit hídrico marcado en la CS1 afectó gran parte del período vegetativo y el período de llenado de granos. Durante la CS2 las grandes lluvias acumuladas y la favorable distribución resultaron ventajosas para la producción del cultivo. En la CS3 las precipitaciones durante los meses de noviembre y diciembre fueron escasas; sin embargo, hubo muy buenas condiciones hídricas durante los meses de enero y febrero. Finalmente, se presentaron condiciones de estrés hídrico que afectaron el normal crecimiento del cultivo.

En trigo, para la CT1 podemos decir que a pesar de las Pp favorable en los últimos días de octubre se registraron temperaturas máximas por encima de los 36 °C que incidió negativamente en la etapa de llenado efectivo del grano. En la CT2 las lluvias durante el inicio del otoño fueron escasas, pero debido a los elevados registros estivales las reservas edáficas a la siembra fueron muy buenas (239 a 256 mm de agua útil hasta 1,6 m de profundidad). Esta situación permitió que, a pesar de la escasez de las lluvias durante los meses de invierno, no se manifesten síntomas de estrés hídrico. Para la CT3 las lluvias de fin del verano y otoño permitieron una buena reserva de agua útil en el perfil. Desde antesis en adelante

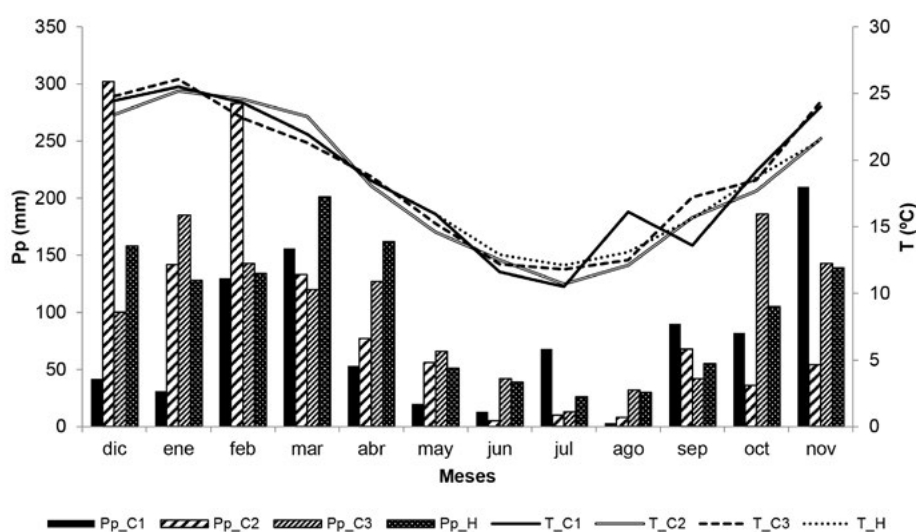


Figura 1. Precipitaciones (Pp, en mm) y temperaturas medias (T, en °C) registradas en la localidad de Esperanza (provincia de Santa Fe) durante las campañas 2008/2009 (C1), 2009/2010 (C2), 2010/2011 (C3) y registros históricos (H).

Figure 1. Precipitation (Pp, mm) and average temperature (T, °C) recorded in Esperanza (Santa Fe province) during the growing seasons 2008/2009 (GS1), 2009/2010 (GS2), 2010/2011 (GS3) and historical records (H).

las lluvias fueron buenas, permitieron recomponer las reservas y llegar al fin del ciclo con buena disponibilidad hídrica. Esto último no se tradujo en mayores rendimientos con respecto a las campañas anteriores.

Cambios en las propiedades físicas del suelo

En la **Figura 2** se muestran los cambios a través del tiempo y según la secuencia de cultivos S-T/S-T/S-T de las variables de suelo Ds, RP y Pa superficial (0-7 cm) y profunda (8-13 cm). Los suelos que fueron descompactados con paratill (d) incrementaron con el transcurso del tiempo la Ds y la RP y disminuyeron el % Pa, tanto superficial como en profundidad. Este efecto fue más marcado desde CS1 (2008) hasta CT2 (2010) (a dos años del pasaje del paratill), para luego, a partir de CS3 (2010/2011) presentar cierta estabilidad hasta el final del ensayo. En tanto que, los suelos sd mostraron valores más o menos constantes de Ds, RP y Pa superficial y profunda en los primeros años, con tendencia de mejora al final del ensayo.

Desde el inicio del ensayo hasta la finalización del mismo, la Ds superficial y profunda en los tratamientos d aumentó un 7,44 y 3,82%; mientras que, en los sd disminuyó un 2,21 y 4,17%, respectivamente. Los registros de Ds llegaron a valores similares entre d y sd, por lo cual la residualidad de la descompactación del suelo con paratill no se manifestó.

Con respecto a la RP superficial y profunda en los suelos d aumentó un 46,0 y 22,5% y, en los sd disminuyó un 1,30 y 13,2%. Al finalizar el ensayo, los valores de RP en d (superficial y profunda) fueron un 27,3 y 21,7% inferiores con respecto a los sd, manifestándose el efecto residual de la descompactación. Esto podría deberse al efecto de las raíces del trigo sobre el suelo en la secuencia trigo/soja. Gerster *et al.* (2010) encontraron que, tanto la inclusión de gramíneas en la secuencia como la descompactación mecánica, disminuyeron la RP, manteniéndose el efecto residual hasta 3 años después de realizada la labor, sin encontrar efectos directos o residuales de la descompactación sobre el rendimiento del cultivo de soja.

Los tratamientos d presentaron desde CS1 los mayores valores de Pa superficial y profunda, para ir disminuyendo a través del tiempo en un 21,7 y 18,2% al final del ensayo. Los valores de Pa superficial obtenidas no llegaron a ser limitantes según los valores críticos citados por Stirzaker *et al.* (1996), quien considera adecuado un valor de 13% de Pa y, más recientemente, Kay *et al.* (2006) e Imhoff *et al.* (2010) indicaron valores cercanos o mayores a 15%. En tanto que la Pa profunda en los suelos sd fue limitante considerando los umbrales citados anteriormente.

El incremento de la Pa juega un papel preponderante para el desarrollo del sistema radical de los cultivos. La densidad radical del cultivo de trigo pudo determinar la existencia de bioporos.

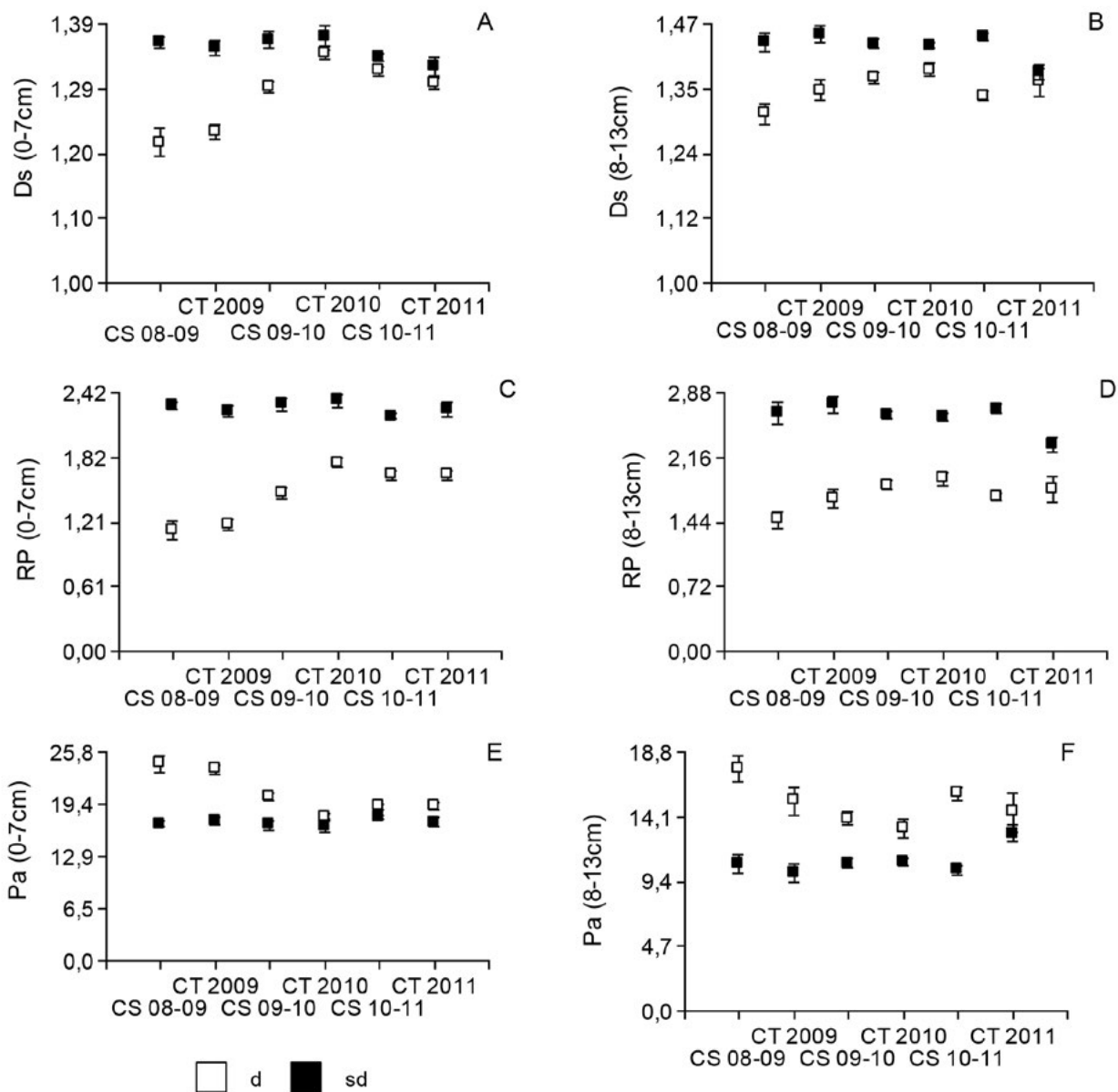


Figura 2. Evolución en el tiempo de la densidad del suelo (D_s - $g\ cm^{-3}$, A y B), la resistencia a la penetración (RP -MPa-, C y D) y la porosidad de aireación (P_a -%, E y F) superficial (0-7 cm) y profunda (8-13 cm) según nivel de compactación del suelo (d= descompactado y sd= sin descompactar) en la secuencia de cultivos soja-trigo/soja-trigo/soja-trigo durante las campañas 2008/2009, 2009/2010 y 2010/2011.

Figure 2. Evolution over time of soil bulk density (B_d - $g\ cm^{-3}$, A and B), resistance to penetration (RP -MPa-, C and D) and aeration porosity (A_p -%, E and F) superficial (0-7 cm) and deep (8-13 cm) according to level of soil compaction (d= decompactado and wd= without decompactado) in the sequence of soybean-wheat/soybean-wheat/soybean-wheat during the growing seasons 2008/2009, 2009/2010 and 2010/2011.

La formación de estos bioporos en suelos compactados ha sido bien documentada por Williams & Weil (2004) y Sasal & Andriulo (2005) y, su liberación, al descomponerse las raíces originarias, explicaría la disminución de la RP y D_s como el aumento en la P_a profunda en los suelos sd al final de la secuencia de cultivos.

Efecto directo y residual de la descompactación del suelo sobre el rendimiento

El rendimiento y P1000 en el cultivo de soja presentó interacción entre $NC \cdot Año$. La variable $N^{\circ}G\ m^{-2}$, no mostró interacción, por lo cual se analizó el efecto principal del factor NC y Año (**Tabla 1**).

Tabla 1. Componentes del rendimiento de soja (cv RA 725) según nivel de compactación (NC) y campaña (Año; CS1 2008/09, CS2 2009/10 y CS3 2010/11). Apertura de la interacción NC*Año para las variables P1000 y Rto. Referencias: número de granos por m² (N^oG m²), peso de 1000 granos (P1000), rendimiento (Rto).

Table 1. Soybean yield components (cv RA 725) according to compaction level (CL) and growing seasons (Year; GSS1 2008/09, GSS2 2009/10 and GSS3 2010/11). Opening interaction CL*Year for W1000 and Yd. References: number of grains per m² (N^oG m²), weight of 1000 grains (W1000), yield (Yd).

		N ^o G m ²	P1000 (g)	Rto (g m ²)
NC	d	2690 b	111,5	304,6
	sd	2468 a	107,6	273,6
Año	CS1 2008/09	2014 a	105,9	213,5
	CS2 2009/10	3385 c	130,1	438,5
	CS3 2010/11	2336 b	92,7	215,3
Análisis de la varianza				
NC		0,0496	ns	0,0078
Año		<0,0001	<0,0001	<0,0001
NC*Año		ns	0,0487 (*)	0,0473 (*)
Apertura interacción (*)				
Año	NC			
CS1	d		106,2 a	240,4 b
	sd		106,3 a	186,6 a
CS2	d		129,5 a	436,3 a
	sd		132,2 a	440,9 a
CS3	d		100,1 b	237,2 b
	sd		86,0 a	193,5 a

Letras diferentes dentro de una misma columna, indican diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$).

El número de granos m⁻² difirió significativamente según los años o campañas. En la CS2 este componente fue un 68 y 45% mayor a las CS1 y CS3, respectivamente. El efecto residual de la descompactación se manifestó logrando un 9% más de granos que los suelos sd.

El rendimiento logrado en CS1 fue un 29% superior -53,8 g m⁻²- en los suelos d con respecto a los sd, en tanto que en CS3 esta diferencia debida al efecto residual de la descompactación fue del 22% -43,7 g m⁻²- (**Tabla 1**, apertura interacción). Estos datos concuerdan con los hallados

por Martino (1998); Bonel *et al.* (2005); Bonel & Montico (2007) y Mon (2007), quienes argumentaron un aumento del rendimiento debido a la descompactación profunda dada por el paratill. Terminiello *et al.* (2007) determinaron sobre un suelo franco limoso que el pasaje de un descompactador mejoró el rendimiento de un cultivo de soja en un 16,3% conducido en SD, en condiciones de alta impedancia del suelo.

Busscher *et al.* (2006) también informaron incrementos de rendimiento en soja de 36 g m⁻² para tratamientos d en relación a los sd en suelos franco-arenosos, donde la labranza fue más dominante que el tipo de suelo. Por otra parte Mon (2007) evidencia que los tratamientos de subsolado en dos series de suelo con elevado contenido de limo, aún después de tres años de aplicados presentan incrementos productivos importantes.

En la CS2 no se observaron respuestas en rendimiento al efecto residual de la descompactación realizada en CS1. Sadras *et al.* (2005) concluyeron que los beneficios sobre el rendimiento se esperan que sean menores en estaciones extremadamente secas o extremadamente húmedas y, cuando el suelo por debajo de la zona de compactación esté seco. Barber & Díaz (1992) informaron una relación inversa entre la respuesta de soja a suelos d y lluvias estacionales por encima de 760 mm. La respuesta al NC dependió de las condiciones estacionales, cantidad inicial y distribución de agua en el perfil del suelo, que permitieron mantener el suelo húmedo disminuyendo la RP, debido a que estas variables están inversamente relacionadas.

El peso de mil de granos del cultivo de soja no mostró diferencias entre tratamientos en CS1 y CS2, pero sí en CS3, siendo un 16% inferior en los suelos sd con respecto a d (**Tabla 1**, apertura interacción). Esto se atribuye al estrés hídrico ocurrido durante el estado de llenado de grano (cuando el número de granos ya se ha fijado), que acortó la duración de esta fase al acelerar la senescencia foliar y la madurez fisiológica reduciendo el peso de los granos y el rendimiento.

En el cultivo de trigo tanto el NG m⁻² como el rendimiento presentaron respuestas similares y significativas según los factores NC y Año. El ma-

Tabla 2. Componentes del rendimiento de trigo según nivel de compactación (NC) y campaña (Año; CT1 2009, CT2 2010 y CT3 2011). Referencias: espigas por m² (E m²), número de granos por m² (N^oG m²), peso de 1000 granos (P1000) y rendimiento (Rto).

Table 2. Wheat yield components according to compaction level (CL) and growing seasons (Year, GSW1 2009, GSW2 2010 and GSW3 2011). References: spikes per m² (S m²), number of grains per m² (N^oG m²), weight of 1000 grains (W1000) and yield (Yd).

		E m ²	N ^o G m ²	P1000 (g)	Rto (g m ⁻²)
NC	d	486,9 b	11224 b	29,7 a	333,4 b
	sd	454,8 a	10534 a	30,2 a	318,3 a
Año	CT1 2009	363,8 a	10337 a	28,5 a	294,2 a
	CT2 2010	514,5 b	11300 b	34,3 b	385,8 b
	CT3 2011	534,3 b	11001 b	27,1 a	297,6 a
Análisis de la varianza					
NC		0,0172	0,0053	ns	0,0257
Año		<0,0001	0,0054	<0,0001	<0,0001
NC*Año		ns	ns	ns	ns

Letras diferentes dentro de una misma columna, indican diferencias significativas según el test LSD ($P \leq 0,05$). ns: no significativo ($P > 0,05$).

por N^oG m⁻² y rendimiento se obtuvieron según el NC en los suelos d incrementándose un 7 y 4,7% respectivamente. Durante la CT2 el rendimiento superó en un 31% a las demás campañas. No presentó diferencias significativas el P1000 según el NC del suelo, siendo menores en la CT3 (**Tabla 2**).

Las variaciones en rendimiento se explicarían principalmente por el N^oG, coincidiendo con la bibliografía (Slafer & Rawson; 1994; Miralles & Slafer, 1999). Los valores de E m⁻² se encuentran dentro de los rangos presentados en diferentes trabajos. Astegiano *et al.* (2003) obtuvieron valores de E m⁻² de 250 a 350 para una campaña seca; mientras que, Imvinkelried *et al.* (2013) citaron 430 a 540 E m⁻² para distintas dosis de fertilizante en el Departamento Las Colonias (Santa Fe). Por otro lado, Oussible *et al.* (1992) concluyeron que la reducción del rendimiento en trigo en respuesta a la compactación del subsuelo era debido a la reducción en las E m⁻², respuesta que pudo observarse en el presente ensayo con un 7% menos de E m⁻² logradas en sd vs. d. El peso de los granos también fue similar a los encontrados en la bibliografía, en trabajos como los de Astegiano *et al.* (2003) e Imvinkelried *et al.*

(2013) quienes obtuvieron valores entre 25 a 34 g en el P1000.

CONCLUSIONES

La descompactación fue efectiva y se observó el efecto residual a través de la variable de suelo RP, la cual mantuvo diferencias significativas al final del ensayo con respecto a los suelos sd. Dichos tratamientos -sd- mostraron una tendencia de mejora subsuperficial en los valores de Ds y RP, lo que podría deberse al efecto de las raíces del cultivo de trigo sobre el suelo en la secuencia trigo/soja. El rendimiento logrado por el cultivo mejoró en las condiciones de descompactación. El efecto ocasionado por las variaciones entre años (precipitaciones en cultivos de secano) influye directamente sobre la respuesta a la descompactación del rendimiento final.

BIBLIOGRAFÍA

- Astegiano, E; OM Hermann; G Leurino & J Menegón. 2003. Comportamiento de componentes de rendimiento en cultivares de trigo nuevos para la región central de la provincia de Santa Fe. FAVE Sección Ciencias Agrarias. 2 (1): 19-28.
- Barber, RG & O Díaz. 1992. Effects of deep tillage and fertilization on soya yields in a compacted Ustochrept during

- seven cropping seasons, Santa Cruz, Bolivia. *Soil Till. Res.* 22: 371-381.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. In: A Klute (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. Pp. 363-375. Ed. America Society of Agronomy. Madyson.
- Bonel, B; S Montico; G Sponda & N Spurino. 2005. Descompactación del suelo mediante el uso de escarificadores en Argiudoles típicos del sur de Santa Fe. En: D Jorajuría (ed.). *Reología de suelos bajo tráfico*. Pp. 1-11. Ed. EDULP. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- Bonel, B & S Montico. 2007. Las posibilidades del escarificado en suelos del sur de Santa Fe. *Agrimensajes*. 21 (4): 26-36.
- Botta, GF; D Jorajuría; R Balbuena; M Ressia; C Ferrero; H Rosatto & M Tourn. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Heliantus annus* L.) yields. *Soil Till. Res.* 91: 164-172.
- Busscher, WJ. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transaction ASAE*. 33: 519-524.
- Busscher, WJ; PJ Bauer & JR Frederick. 2006. Deep tillage management for high strength southeastern USA Coastal Plain soils. *Soil Till. Res.* 85: 178-185.
- Cosentino, DJ & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la Región Pampeana. *Ci. Suelo*. 20: 9-16.
- Ferreras, LA; JJ De Battista; A Ausilio & C Pecorari. 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesq. Agrop. Bras.* 36 (1): 161-170.
- Gerster, G; S Bacigaluppo; M Bodrero & F Salvagiotti. 2010. Secuencia de cultivos, descompactación mecánica y rendimiento de soja en un suelo degradado de la región pampeana. *Para Mejorar la Producción*. 45: 55-59.
- Ghiberto, PJ; MA Pilatti; S Imhoff & JA Orellana. 2007. Hydraulic conductivity of molisolls irrigated with sodio-bicarbonated waters in Santa Fe (Argentina). *Agric. Water Manag.* 88: 192-200.
- Glinski, J & J Lipiec. 1990. *Soil physical conditions and plant roots*. CRC Press Inc. Boca Ratón, Florida, USA. 250 pp.
- Gupta, SC & RR Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: 65-100.
- Hakansson, I & WB Voorhees. 1998. Soil compaction. In: R Lal et al. (eds.). *Methods for assessment of soil degradation*. Pp. 167-179. Lewis Publishers. Boca Raton.
- Hamza, MA & WK Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Till. Res.* 82: 121-145.
- Imhoff, S; PJ Ghiberto; A Grioni & JP Gay. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma*. 158: 268-274.
- Imvinkelried, HO; IM Dellaferrera; OM Hermann; M Pietrobón; O Zen & R Maumary. 2013. Efecto de la fertilización con Ca, Mg, N, P y S sobre los componentes de rendimiento de trigo en el Departamento Las Colonias, Santa Fe. *FAVE Sección Ciencias Agrarias*, 12(1/2): 23-34.
- Jorajuría, D & L Draghi. 1997. The distribution of soil compaction with depth and the response of a perennial forage crop. *J. Agric. Eng. Res.* 66: 261-265.
- Kay, BD; MA Hajabbasi; J Ying & M Tollenaar. 2006. Optimum versus non-limiting water contents for root growth, biomass accumulation, gas exchange and the rate of development of maize (*Zea mays* L.). *Soil Till. Res.* 88: 42-54.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. In: A Klute (ed.). *Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods*. Pp. 635-660. Ed. Am. Soc. Agron. Madison. USA.
- Martino, DL. 1998. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. Tesis Ph.D. University of Manitoba, Canada.
- Miralles, DJ & GA Slafer. 1999. Wheat development. In: EH Satorre & GA Slafer (eds.). *Wheat: ecology and physiology of yield determination*. Pp. 13-43. Food Product Press. New York, USA.
- Mon, R. 2007. Ampliación del perfil de suelos erosionados y compactados mediante subsolado con enmienda cálcica profunda. Tesis doctoral. Universidad de Coruña, Facultad de Ciencias. Coruña, España. 164 pp.
- Oussible, M; RK Crockston & WE Larson. 1992. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agron. J.* 84: 34-38.
- Pilatti, MA; S Imhoff; PJ Ghiberto & RP Marano. 2006. Changes in some physical properties of Molisoll induced by supplemental irrigation. *Geoderma*. 33: 431-443.
- Rubio, G; MJ Cabello; FH Gutiérrez Boem & E Munaro. 2008. Estimating available soil P increases after P additions in Mollisols. *Soil Science Soc. Amer. J.* 72: 1721-1727.
- Sadras, VO; JG O'Leary & DK Roget. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91: 131-148.
- Sasal, MC & A Andriulo. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L. (nabo forrajero). *R. Cient. Agrop.* 34: 131-150.
- Sasal, MC; A Andriulo & M Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.

- Slafer, GA & HM Rawson. 1994. Sensitivity of wheat phasic development to major environmental factors: a re-examination of some assumptions made by physiologists and modellers. *Aust. J. Plant Phys.* 21 (4): 393-426.
- Spoor, G. 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use Manage.* 22: 113-122.
- Stirzaker, RJ; JB Passioura & Y Wilms. 1996. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant Soil.* 185: 151-162.
- Taboada, MA; F Micucci & C Álvarez. 2008. Impedancias mecánicas y compactación en suelo agrícolas. En: MA Taboada & CR Álvarez (eds.). *Fertilidad Física de los suelos*. Pp. 93-153. Ed. FAUBA. Buenos Aires, Argentina.
- Terminiello, A; R Balbuena; M Ariata; J Hilbert; J Claverie & D Jorajuría. 2007. Descompactación del suelo y tráfico de siembra: efectos sobre el rendimiento de soja (*Glycine max* L Merr). En: Congreso Argentino de Ingeniería Rural. 9º Congreso del Mercosur. 19 al 22 de septiembre de 2007. Córdoba. Argentina.
- Williams, S & R Weil. 2004. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1403-1409.