

Compactación en siembra directa. Consecuencias del tránsito durante la operación de siembra sobre la pérdida de porosidad libre al aire del suelo

Cerisola, Cecilia^{1,2}; Laura Draghi¹; Daniel Jorajuría Collazo¹

¹ Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de La Plata. Av. 60 y 119 (1900) La Plata. Argentina; ²ceciliacerisola@gmail.com

Cerisola, Cecilia; Laura Draghi; Daniel Jorajuría Collazo (2014) Compactación en siembra directa. Consecuencias del tránsito durante la operación de siembra sobre la porosidad libre al aire del suelo. Rev. Fac. Agron. Vol 113 (2): 123-133.

En la Argentina unas 27 millones de hectáreas se trabajan bajo el sistema de siembra directa, el cual intenta además de rentabilidad económica, mejorar la ecología del suelo y proteger recursos naturales manteniendo residuos en superficie. Las mejores condiciones para el tráfico son innegables, pero esa mayor resistencia mecánica puede traer modificaciones físicas que conducen a su compactación con consecuencias como la mayor demanda energética y la contaminación del ambiente, problemáticas incompatibles con los modernos desafíos de la ingeniería agrícola. El objetivo del presente trabajo fue cuantificar los cambios producidos en la porosidad libre al aire y en la densidad aparente de un suelo Argiudol típico, bajo un ensayo de siembra directa, donde se implantó un cultivo de soja y sometido a descompactación. La evolución de la compactación inducida por tráfico se cuantificó en zonas no transitadas y transitadas por un tractor o por una sembradora; las variables elegidas fueron densidad aparente y porosidad libre al aire. El suelo escarificado aumentó significativamente la porosidad libre al aire y disminuyó la densidad aparente con respecto al suelo testigo para todas las profundidades analizadas y durante todo el tiempo que duró el ensayo. El pasaje del tractor nunca modificó la porosidad libre al aire cuando transitó el suelo testigo. En los estratos inferiores es donde mayormente detectaron los efectos benéficos de la descompactación, al disminuir la densidad aparente y aumentar la porosidad al aire: también estas profundidades registraron los mayores valores de compactación luego del pasaje del tractor o la sembradora.

Palabras clave: porosidad, densificación, no labranza, descompactación, impedancia.

Cerisola, Cecilia; Laura Draghi; Daniel Jorajuría Collazo. *Soil compaction in direct seeding. Air-filled porosity loss as a consequences of transit during sow operations*. Rev. Fac. Agron. Vol 113 (2): 123-133.

About 27 million hectares are under no tillage conditions in Argentina, producing throw direct seeding techniques. Pursued aims are, not only to increase rentability, but to increase soil environment and to protect natural sources due to permanent presence of superficial residues. This soil condition leads to better mechanical behaviour during traffic, but that increment in soil reaction became against total fertility, due to diminishes in macropore amount and relationship among them. Major energy requirements during sow operations, is a consequence as well. And finally, a contribution to pollution and global heating, opposites to pursued environmental policies. Our objective was to quantify changes in air free porosity, in a soybean crop, sowed on a Typical Argiudol soil, leaded in no tillage condition, but receiving mechanical treatment for periodical loosening. Induced traffic soil compaction evolution, was assessed in free transit areas, and areas trafficked by a tractor or a direct driller. Dependent variables were: bulk density and free air porosity. Loosened soil showed a significant increment in porosity and a consequent reduction in bulk density, related to control plot without mechanical treatment, for the whole range of depths assessed. Free air porosity never was modified in the control plot, below tractor's ruts. In lowers layers, benefic effect of soil loosen was evidenced, not only by an increment of pores, but a diminution in bulk density, as well. As expected, these deeper layers showed significant higher compactness conditions, as measured after traffic.

Keywords: no tillage, soil resistance, porosity, soil compactness, impedance

Recibido: 06/11/2012

Aceptado: 26/01/2015

Disponible on line: 01/03/2015

ISSN 0041-8676 - ISSN (on line) 1669-9513, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP, Argentina

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los sistemas de producción intensivos han contribuido en la mejora sustancial de la rentabilidad económica y el desarrollo social. Paralelamente, han potenciado la degradación del medio ambiente al aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad, la reducción de ecosistemas y la afectación de la conservación del suelo y el agua (Millennium Ecosystem Assessment, 2005; Kirschenmann, 2010). El gran desafío es el diagnóstico de la calidad de vida de los suelos, para poder desarrollar un sistema productivo basado en una agricultura sostenible en sí misma, conservadora de los recursos, eficiente en energía y socialmente viable.

Las prácticas de producción de cultivos, determinantes de las propiedades físicas que condicionan el movimiento del agua y la disponibilidad de oxígeno, pueden incluir rotaciones del suelo con diferentes intensidades hasta sistemas menos intervencionistas como la siembra directa. En la Argentina, aproximadamente el 80% de la superficie cultivada, algo más de 27 millones de hectáreas (Aapresid, 2012), se trabaja bajo este sistema. El mismo busca mantener residuos en superficie para aumentar la materia orgánica disponible a largo plazo y tener suficiente energía y nutrientes para los microorganismos heterotróficos. Asimismo, este sistema mejora la infiltración del agua de lluvia, controla fenómenos de erosión e intenta mejorar la ecología del suelo y proteger recursos naturales (Erenstein, 2002). Las mejores condiciones para el tráfico son innegables, pero esa mayor resistencia mecánica puede traer modificaciones físicas que conducen a su compactación (Hilbert & Tesouro, 2002; Bonel et al., 2004; Botta et al., 2010; Melero et al., 2011). En un suelo que se compacta, el efecto más inmediato es la disminución del volumen de los poros de mayor tamaño, los cuales están ocupados por aire. Ferreras et al. (2001) estudiaron el efecto de dos sistemas de labranza, vertical y siembra directa, sobre algunas propiedades del suelo y el rendimiento de soja. En la experiencia, realizada sobre un suelo Argiudol típico, se registraron menores valores de porosidad estructural bajo el sistema de siembra directa. Concluyeron que este factor puede incidir sobre el volumen de exploración de raíces y el movimiento de agua y aire.

La compactación de los suelos cultivados es una problemática muy compleja que implica su degradación química, física y biológica. Consecuentemente aparecen mayores demandas de fertilizantes y pesticidas acompañadas de posibles problemas de erosión conducentes al aumento del escurrimiento. El esfuerzo para roturar los suelos densificados es mayor, ocasionando inmediatos incrementos de gastos de combustible que generan siempre, como efectos secundarios nocivos, la producción e incorporación a la atmósfera de gases contaminantes como CO₂, NO_x y cadenas de hidrocarburos no totalmente oxidados. La mayor demanda energética y la contaminación del ambiente son problemáticas incompatibles con los modernos desafíos de la ingeniería agrícola que apuntan a la sostenibilidad de la producción agropecuaria y a la calidad del ambiente.

Altos niveles de mecanización que garanticen elevados rendimientos tractivos y altas capacidades de trabajo, han ocasionado un significativo aumento en el tamaño y masa de tractores y máquinas. La siembra directa, ha permitido disminuir la intensidad de tráfico en cuanto al número de pasadas pero no en cuanto a la masa que el suelo agrícola, siempre deformable, debe soportar. Como resultado, aparecen asociados al tráfico, problemas de compactación inducida que en muchos casos pueden localizarse en capas subsuperficiales con el consiguiente problema de su difícil remoción desde el punto de vista ingenieril y económico (Botta et al., 2010). Botta et al. (2007) concluyen que el suelo sufre una muy severa compactación por el alto peso de las máquinas que la siembra directa requiere y el deterioro del mismo puede llegar a ser irreversible si la compactación se ubica en las capas más profundas del suelo. A su vez encuentran que en suelos arcillosos son mayores los riesgos de compactar el subsuelo y mayor será la persistencia del daño pudiendo limitar la producción agrícola.

La compactación del suelo como resultado del tráfico incrementa la densidad aparente, la resistencia a la penetración y disminuye la porosidad total. La compactación superficial es función del número de pasadas y de la presión de contacto y la subsuperficial del número de pasadas y de la masa total por eje (Jorajuria et al., 1997). Una práctica común para intentar revertir este fenómeno es el uso de descompactadores (Melero et al., 2011; Balbuena et al., 1998; Cisneros et al., 1998; Taboada et al., 1998). La labranza profunda reduce el tamaño de los bloques estructurales y genera disrupciones en la orientación de los mismos, esto incrementa la infiltración al aumentar el volumen de los macroporos, que forman parte de la fracción estructural de la porosidad. Hipps & Hodgson (1988) reportaron un incremento de 7,8 a 13,3% en el volumen de poros mayores a 60 µm en un suelo franco arenoso arcilloso causado por el pasaje de un descompactador *Paraplow*. Distintos autores (Swardji & Eberbach, 1998; Unger, 1993; Secco & Reinert, 1997; Taboada et al., 1998), reportan incidencias favorables sobre las propiedades edáficas, como asimismo respecto del crecimiento y desarrollo de los cultivos, a causa del uso de diferentes tipos de escarificadores. Sin embargo Botta et al. (2010) concluyeron que los efectos del subsolado duran dos años y los del cincelado uno. A su vez, encontraron niveles elevados de densificación y reducciones significativas de la porosidad en capas subsuperficiales en suelos bajo siembra directa durante 12 años aún cuando la masa de tractor y la sembradora fue reducida.

Aluko & Koolen (2001) señalan que el principal parámetro del suelo para garantizar el desarrollo de raíces y el crecimiento de los cultivos, es su espacio poroso. Stengel (1979) define dos grandes grupos de factores de variación de la porosidad del suelo: la constitución granulométrica que condiciona la forma de agrupamiento de las partículas elementales del suelo, generando un sistema de porosidad llamado textural, la cual depende de la constitución mineral y orgánica del material, su contenido en agua y los antecedentes climáticos, biológicos y mecánicos del suelo, de cuyas acciones resulta un segundo sistema de porosidad,

llamado estructural. Según Guérif et al. (2001) la porosidad estructural consiste en los huecos creados por la disposición de los agregados y los terrones debido a la labranza, el clima, y los poros biológicos, mientras que la porosidad textural ó intraagregados no es modificada por acciones mecánicas.

Estudiando distintos sistemas de labranza sobre parámetros físicos de los suelos se han detectado disminuciones de la porosidad total y estructural en sistemas de siembra directa comparada con labranza vertical ó suelo descompactado (Botta et al., 2010, Sasal et al., 2006, Ferreras et al., 2001). Sin embargo hay resultados contradictorios en cuanto a la estructura y funcionalidad del sistema poroso y su relación con el manejo del suelo (Lipiec et al., 2006). Dexter & Richard (2009) concluyen que la humedad óptima para la labranza del suelo es aquella donde la porosidad textural está mayormente saturada y la estructural mayormente drenada, es decir poros llenos de aire.

Otro indicador muy utilizado para detectar la compactación inducida por tráfico es la densidad aparente del suelo y según Daddow & Warrington (1983) que trabajaron en suelos finos, valores de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ son limitantes para el normal desarrollo radicular mientras que $1,65 \text{ Mg m}^{-3}$ es el umbral para detenerlo.

Las preguntas que surgieron frente a este problema fueron:

¿Existe un balance positivo, entre mejoras físicas incorporadas a través de mayor porosidad y menor resistencia a la penetración de raíces, respecto a la condición de mayor compactabilidad resultante, al introducir un tratamiento mecánico descompactador del suelo bajo siembra directa?.

¿El tráfico inmediato posterior al tratamiento de descompactación tiene alcances y persistencia, al menos durante la implantación del cultivo siguiente?.

La hipótesis de trabajo fue considerar que la menor capacidad portante del suelo, resultante de la descompactación periódica por tratamiento mecánico, no es razón suficiente para desaconsejarla en suelos bajo siembra directa.

El objetivo del presente trabajo fue cuantificar los cambios producidos en la porosidad libre al aire de un suelo Argiudol típico, en condiciones de siembra directa, sobre un cultivo extensivo de verano en régimen de secano y sometido a descompactación con un escarificador de arcos curvos (*Cultivie*).

MATERIALES Y MÉTODOS

Las determinaciones se realizaron en la localidad de San Antonio de Areco, provincia de Buenos Aires (coordenadas $34^\circ 18'$ Lat Sur y $59^\circ 56'$ Long Oeste). En el momento de comenzar la experiencia (septiembre-octubre de 2005), este ensayo presentaba una historia de cinco años en siembra directa y se encontraba cubierto de residuos de cosecha de maíz (*Zea mays* L.).

El suelo sobre el que se tomaron los datos pertenece a la clase textural franco limoso, clasificado como Argiudol típico, Fina, illítica, térmica (Soil Survey Staff, 2003), perteneciente a la Serie Río Tala.

El diseño del ensayo consistió en comparar dos tratamientos (T1 y T2), distribuidos según un sistema

aleatorizado de bloques con tres repeticiones cada uno de ellos: T1 (Testigo): Siembra directa sin descompactador y T2 (*Cultivie*): Siembra directa con descompactación previa. A su vez, tanto en T1 como en T2, se delimitaron en el mes de noviembre tres zonas de muestreo, o subtratamientos, coincidiendo con el tránsito durante la operación de siembra: No Huella (NH), Huella Tractor (HT) y Huella Sembradora (HS).

Para la evaluación estadística de este diseño experimental se realizó un análisis de varianza mediante un ANOVA Factorial, sin que el mismo haya arrojado diferencias significativas debidas a las interacciones Tratamiento - Subtratamiento. Por este motivo, se optó por un análisis de varianza simple y posterior test de separación de medias, teniendo en cuenta dos comparaciones: 1) entre tratamientos y 2) entre subtratamientos dentro de cada tratamiento. En el primer caso, a su vez, se analizaron dos zonas: la zona no rodada (NH) y la zona transitada (HT y HS). El seguimiento de la primera fue a lo largo de cuatro fechas de muestreo y a tres profundidades. Las variables dependientes fueron la densidad aparente seca, el contenido de humedad gravimétrico y la porosidad total (integrada en porosidad libre al aire, P_a , y grado de saturación, X). En las zonas transitadas, identificadas después de la operación de siembra, la variable utilizada para comparar ambos tratamientos fue la densidad aparente seca obtenida en las zonas rodadas por el tractor y la sembradora. A los efectos de la segunda comparación, el tránsito o subtratamientos dentro de cada tratamiento, la variable analizada fue la porosidad libre al aire.

La siembra del cultivo se realizó en el mes de noviembre: soja de primera (*Glycine max* L. Merrill). Las fechas de toma de datos se sucedieron a partir del mes de septiembre, previo a la siembra y coincidiendo con la descompactación del tratamiento *Cultivie* (T2), y continuaron en el mes de octubre, noviembre y diciembre.

Variables experimentales: Sobre las parcelas experimentales de $12 \times 50 \text{ m}$, se determinó la densidad aparente (das) con el uso de una sonda nuclear (núcleo-gammamétrica Troxler 3440) a tres profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) y con tres repeticiones por cada profundidad, obteniéndose así nueve datos de la variable das a cada profundidad por subtratamiento a partir de la fecha de noviembre. El procedimiento seguido consistió en obtener inicialmente el valor correspondiente al estrato superficial, 0-10 cm, y a continuación cavar una pequeña trinchera a fin de obtener las otras dos profundidades.

A esas mismas profundidades y con el mismo número de repeticiones que para la densidad aparente, se midió la humedad por gravimetría (%H).

A partir de una muestra compuesta de suelo proveniente de ambos tratamientos y de los 3 bloques, se determinó la densidad real (dr) por picnometría en alcohol etílico de 96° . Se realizaron un total de seis repeticiones para cada una de las tres profundidades estudiadas y se consideró, para cada profundidad, el valor promedio de las seis repeticiones. A partir de los datos de das y dr se calcularon:

a) la porosidad total del suelo: $PT = \text{volumen de poros/volumen total de suelo } (V_p/V)$;

b) la porosidad libre al aire: $P_a = \text{volumen de poros con aire/volumen total de suelo (} V_a/V \text{)}$

c) el grado de saturación: $X = \text{volumen de poros con agua/volumen de poros (} V_w/V_p \text{)}$.

Se utilizó un descompactador (*Cultivie*) de montantes curvos, de 4 arcos, dispuestos en dos planos de acción distanciados 0,6 m. Los montantes en el plano delantero tenían una separación de 0,55 m entre rejas y en el plano trasero de 1,6 m. El despeje del implemento fue de 0,85 m y estaba equipado con cuchillas de corte de residuos por delante de la línea de acción de los órganos activos. La profundidad de trabajo efectiva varió entre 25 y 30 cm, mientras que la velocidad de trabajo fue de 2,03 m seg^{-1} .

En la Tabla 1 se resumen las características del tractor y la sembradora utilizadas.

Tabla 1. Datos del tractor y la sembradora utilizados

Tractor modelo	John Deere 3420
Masa Total	5,015 Mg
Rodado trasero	18,4 – 34
Superficie apoyo	1853 cm^2
Presión de contacto rueda suelo	115 kPa
Rodado delantero	7,50 – 16
Sembradora modelo	John Deere 1560
Masa Total	3,928 Mg
Rodados	12,5 – 15
Superficie apoyo	681 cm^2
Presión de contacto rueda suelo	146 kPa
Distancia entre líneas de siembra	0,38 m
Cantidad de surcos	11

Para conocer el valor de densidad aparente máxima y la humedad óptima de compactación se realizó un ensayo estándar Proctor (ASTM, 1992) para tres intervalos de profundidad.

Tabla 2. Densidad aparente (Proctor) máxima y contenido de humedad óptimo de compactación a tres profundidades.

Profundidad (cm)	Densidad aparente (Mg m^{-3})	% Humedad (w/w)
0-15	1,54	29
15-30	1,57	25
30-60	1,61	22

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las Figuras 1 y 2 se muestran los resultados de las variables analizadas en la zona no rodada (NH), que permiten comparar ambos tratamientos en las cuatro fechas de muestreo.

Si bien el contenido de humedad varió entre fechas, no registró diferencias entre los tratamientos. La siembra se hizo en condiciones de humedad muy por debajo de la óptima de compactación (Tabla 2) y las dos tomas de datos posteriores también registraron valores de humedad muy inferiores (Figura 1).

El suelo descompactado presentó, para las zonas no rodadas, una porosidad libre al aire (asociada a la macroporosidad) significativamente mayor que el suelo testigo. Esto demuestra los efectos benéficos del pasaje del *Cultivie* hasta los 30 cm, coincidiendo con la profundidad del descompactador (Figura 2). Las diferencias encontradas fueron a todas las profundidades y en todas las fechas de muestreo. Esto coincide con Bonel et al. (2004), quienes encontraron que el tratamiento de siembra directa, acumulaba el 77% de la porosidad total en tamaños de poros inferiores a 20 μm , responsables de la retención de agua, frente al 70% que acumulaba el tratamiento descompactado mediante escarificadores. También son concordantes con los resultados encontrados por Hilbert & Tesouro (2002) y por Hippias & Hodgson (1988).

De todas formas la porosidad al aire no alcanzó valores limitantes en ninguno de los dos tratamientos, siendo siempre superior al 10%, umbral que comúnmente se utiliza como condicionante para el normal crecimiento de los cultivos.

El suelo testigo, salvo en una ocasión (noviembre) y a 30 cm, mantuvo su porosidad libre al aire cuando fue transitado por el tractor ó la sembradora, por lo tanto puede inferirse que su mayor capacidad portante inicial permitió resistir el efecto del tránsito (Figura 3). Los valores de porosidad libre al aire variaron entre 18% y el 28%.

El suelo escarificado tuvo valores de porosidad libre al aire que variaron entre el 20% y el 33% (Figura 4). Dicho tratamiento presentó una mayor susceptibilidad a cambiar su condición de porosidad cuando fue transitado. En noviembre a los 10, 20 y 30 cm de profundidad, el pasaje del tractor redujo significativamente dicho parámetro con respecto al suelo no transitado. En diciembre ocurrió lo mismo a 20 cm y a 30 cm. La sembradora sólo redujo la porosidad al aire en una ocasión (noviembre) y a los 30 cm de profundidad. De todas maneras, cuando hubo reducciones de porosidad y los valores se acercaron a los del suelo testigo, estos siguieron siendo superiores en un 9% en promedio.

Las presiones de contacto calculadas (cociente entre la masa y la superficie de apoyo) del tractor y la sembradora son similares, pero el tractor tiene un 25% más de masa, con lo cual esa diferencia sería la responsable de la afectación de la macroporosidad a los 20 y 30 cm. En esto se coincide con Botta et al. (2010), quienes encontraron una relación directa entre el peso y la compactación del subsuelo independientemente de la presión de contacto rueda-suelo.

Los valores absolutos de densidad aparente del suelo escarificado en los tres subtratamientos siempre fueron menores que los del suelo testigo. En las zonas no rodadas esas diferencias entre tratamientos son estadísticamente significativas en el 67% de los casos y fundamentalmente en los estratos inferiores, 20 y 30 cm

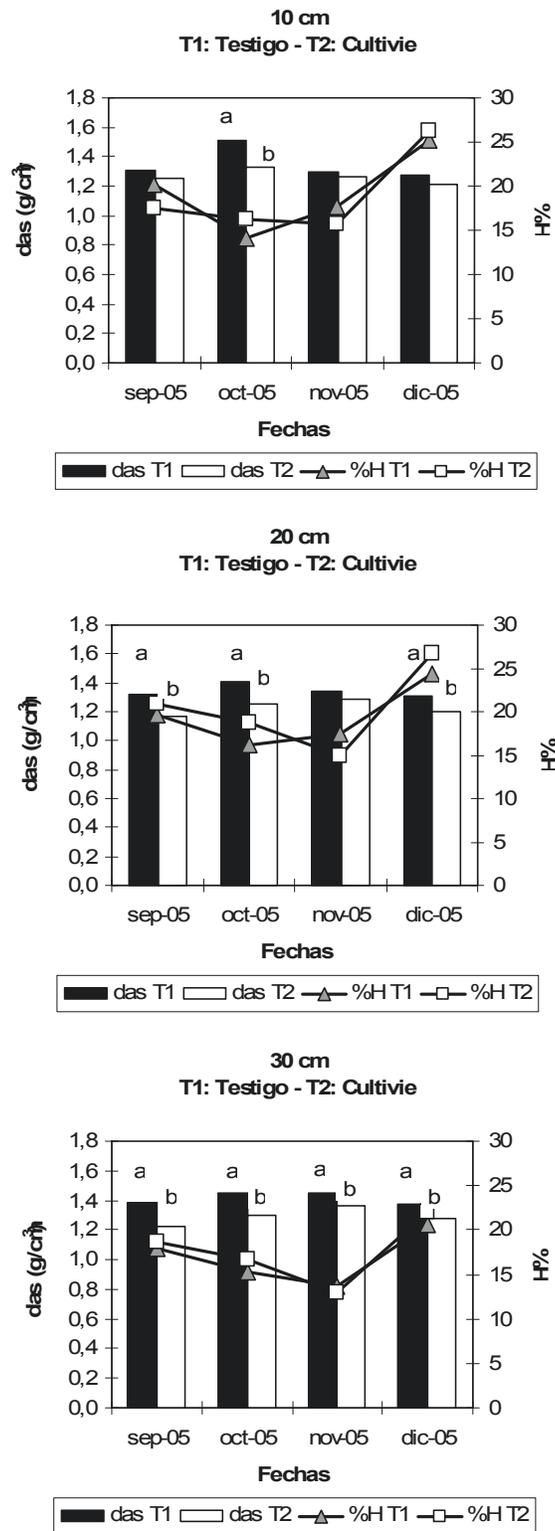


Figura 1. Densidad aparente seca (das) y contenido gravimétrico de humedad (%H) entre tratamientos (T1 y T2), a las tres (3) profundidades estudiadas y en todas las fechas de muestreo para la zona no rodada (NH). Letras diferentes entre columnas de una misma fecha indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para el Test de Duncan de la variable das.

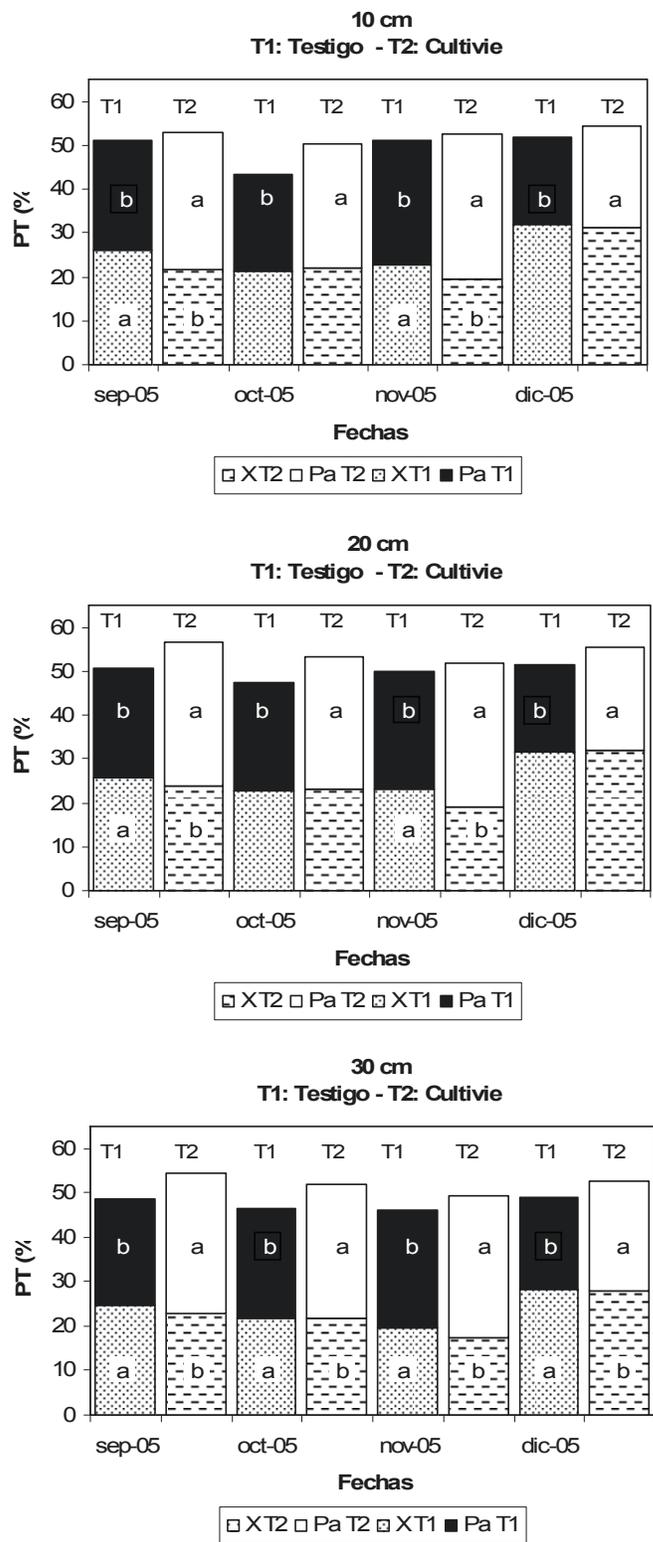


Figura 2: Porosidad libre al aire (Pa) y grado de saturación (X) integradas en la porosidad total (PT) analizadas entre tratamientos (T1 y T2), a las tres (3) profundidades estudiadas y en todas las fechas de muestreo para la zona no rodada (NH). Letras diferentes entre columnas de una misma fecha indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para el Test de Duncan. Ausencia de letras significa sin diferencias estadísticas.

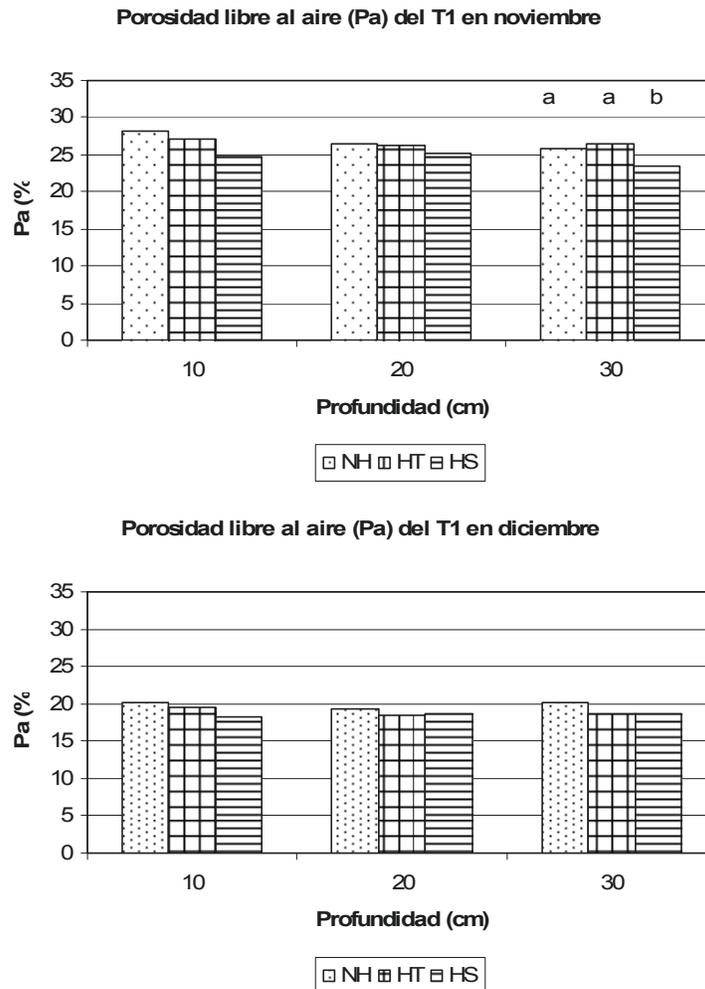


Figura 3. Porosidad libre al aire (Pa) en el suelo testigo para las diferentes profundidades. NH: no huella; HT: huella tractor; HS: huella sembradora. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para el Test de Duncan. Ausencia de letras sin diferencias significativas.

(Figura 1). Si se analiza el suelo descompactado, en ningún subtratamiento se registraron valores limitantes para el normal desarrollo radicular. El suelo testigo, en cambio, presentó 3 valores que sí lo son y fueron registrados en la fecha de noviembre a 30 cm de profundidad (Tabla 3).

Si se comparan ambos tratamientos, el pasaje del tractor ocasionó en las dos fechas de muestreo y a 20 cm de profundidad una menor densidad aparente que el suelo testigo (Figura 5). Para todas las demás instancias los valores de densidad aparente luego del pasaje del tractor no son estadísticamente diferentes entre el suelo testigo y el descompactado. La densidad aparente no ha sido un parámetro sensible para mostrar las diferencias entre tratamientos cuando fue transitado por el tractor (Figura 5).

La sembradora sí mostró menores valores de densidad aparente para el suelo descompactado con respecto al testigo, a los 20 cm en noviembre y en las tres profundidades en diciembre (Figura 6).

Si se analiza el efecto del tránsito sobre cada condición de suelo (Tabla 3) puede verse que cuando el mismo se realizó sobre el suelo sin descompactar, salvo en una ocasión, nunca se modificó la densidad aparente inicial por el pasaje del tractor ó la sembradora, demostrando una vez más la mayor capacidad portante de dicho suelo. Cuando se transitó el suelo descompactado, ambos subtratamientos aumentaron la densidad aparente inicial en el estrato de mayor profundidad (30 cm).

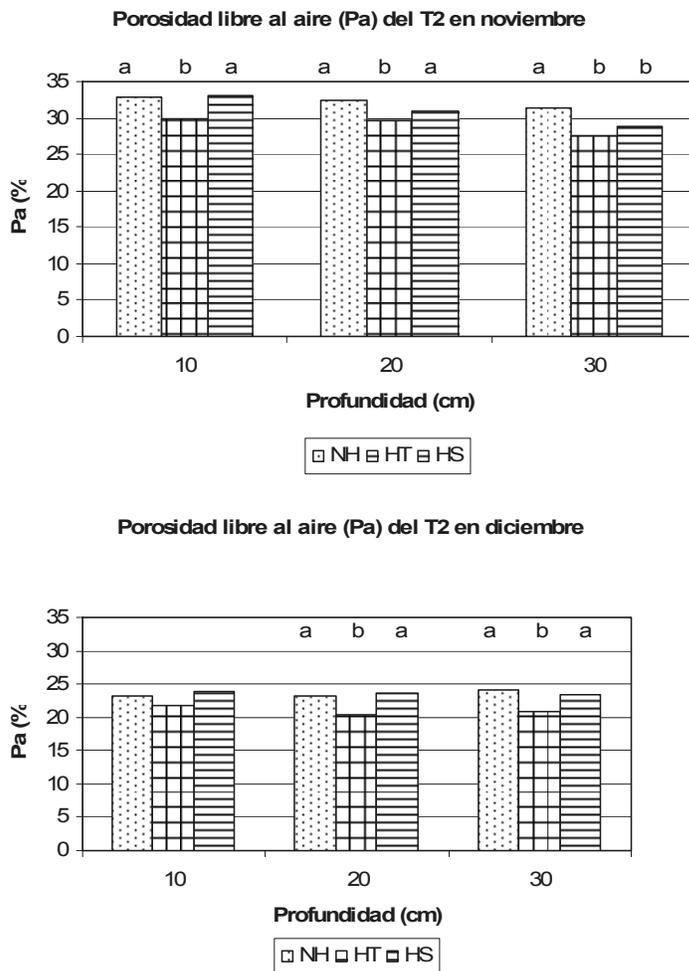


Figura 4. Porosidad libre al aire (Pa) en el suelo descompactado para las diferentes profundidades. NH: no huella; HT: huella tractor; HS: huella sembradora. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para el Test de Duncan.

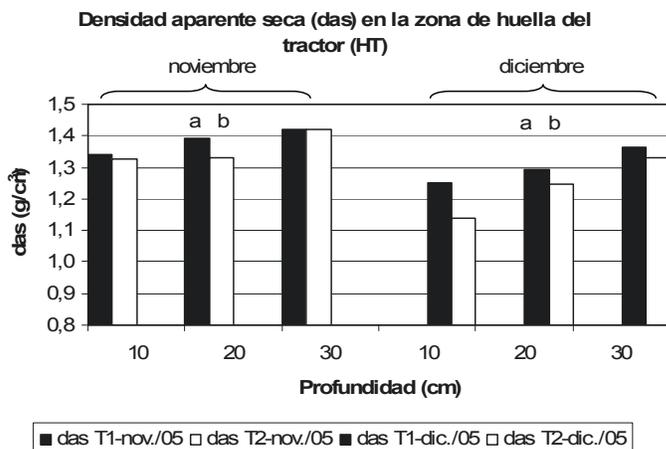


Figura 5. Densidad aparente seca (das) en la huella del tractor (HT) en las dos fechas posteriores a la siembra y a las tres profundidades estudiadas. T1: testigo y T2: descompactado. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para el Test de Duncan.

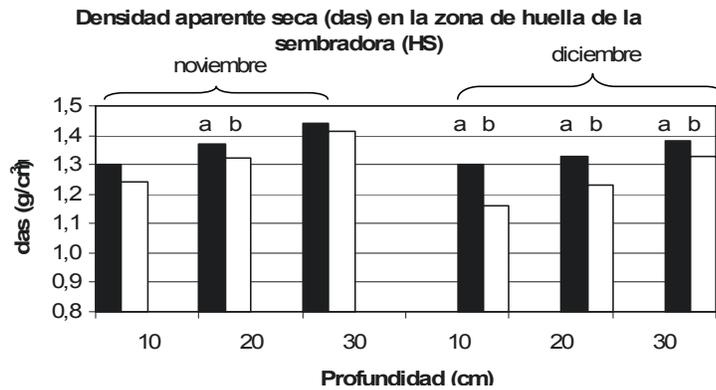


Figura 6. Densidad aparente seca (das) en la huella de la sembradora (HS) en las dos fechas posteriores a la siembra y a las tres profundidades estudiadas. T1: testigo y T2: descompactado. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para el Test de Duncan.

Tabla 3. Densidad aparente seca (das) entre subtratamientos, a cada una de las tres profundidades estudiadas y en las dos fechas posteriores a la siembra (T1: testigo; T2: descompactado; NH: no huella; HT: huella tractor; HS: huella sembradora). Letras diferentes dentro de cada tratamiento indican diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) para el Test de Duncan.

Fecha	Profundidad (cm)	Tratamiento	Sub tratamiento	das
noviembre	10	T1	NH	1,30
			HT	1,34
			HS	1,30
		T2	NH	1,26
			HT	1,32
			HS	1,24
	20	T1	NH	1,34 b
			HT	1,39 a
			HS	1,37 ab
		T2	NH	1,29
			HT	1,33
			HS	1,32
30	T1	NH	1,45	
		HT	1,42	
		HS	1,44	
	T2	NH	1,36 b	
		HT	1,42 a	
		HS	1,42 a	
diciembre	10	T1	NH	1,28
			HT	1,25
			HS	1,30
		T2	NH	1,21
			HT	1,14
			HS	1,16
	20	T1	NH	1,30
			HT	1,29
			HS	1,32
		T2	NH	1,20
			HT	1,25
			HS	1,23
	30	T1	NH	1,38
			HT	1,36
			HS	1,38
		T2	NH	1,28 b
			HT	1,33 a
			HS	1,33 a

Los principales resultados de este trabajo pueden resumirse en las siguientes afirmaciones: (a) el pasaje del tractor nunca modificó la porosidad libre al aire cuando transitó el suelo testigo (Figura 3).

(b) el suelo escarificado aumentó significativamente la porosidad libre al aire con respecto al suelo testigo para todas las profundidades analizadas y durante todo el tiempo que duró el ensayo (Figura 2).

(c) los valores absolutos de densidad aparente del suelo escarificado siempre fueron menores que los del suelo testigo para los tres subtratamientos y para todas las profundidades analizadas (Tabla 3).

(d) para los dos tratamientos y en todas las profundidades analizadas, la densidad aparente luego del pasaje del tractor nunca fue diferente a la de la huella de la sembradora (Tabla 3).

(e) en los estratos inferiores es donde mayormente se pudieron detectar los efectos benéficos del descompactado al disminuir la densidad aparente y aumentar la porosidad al aire y es donde también se registraron los mayores valores de compactación luego del pasaje del tractor o la sembradora.

En virtud de lo anterior, se entiende que no existen datos para falsar la hipótesis de trabajo y en cambio sí existe evidencia suficiente como para darla por validada.

CONCLUSIÓN

La menor capacidad portante del suelo resultante de la descompactación por tratamiento mecánico, no es razón suficiente para desaconsejarla periódicamente en suelos bajo siembra directa.

BIBLIOGRAFÍA

- Aapresid.** 2012. http://www.aapresid.org.ar/wp-Content/uploads/2013/02/aapresid.evolucion_superficie_sd_argentina.1977_a_2011.pdf. Verificado 03/12/2013
- Aluko, O.B. & A.J. Koolen.** 2001. Dynamics and characteristics of pore space changes during the crumbling on drying of structured agricultural soils. *Soil & Tillage Research*. 58: 45-54.
- ASTM,** 1992. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Balbuena, H.R., A. Aragón, P. Mc Donagh, J. Claverie & A. Terminiello.** 1998. Effect of three different tillage systems on penetration resistance and bulk density. In: Proceedings of IV CADIR (Argentine Congress on Agricultural Engineering). 1: 197-202.
- Bonel B.A., J. Denoia, M. Costanzo, G. Giubileo & G. Zerpa.** 2004. Efecto de la Labor de Escarificado sobre un Argiudol Vértico bajo Siembra Directa continua. *Cien. Inv. Agr.* 31(3): 187-196.
- Botta G., E.D. Rivero & S. Stadler.** 2007. Sustentabilidad de la siembra directa en la región pampeana argentina: un enfoque desde la compactación de los suelos. I Seminario de Cooperación y Desarrollo en espacios rurales iberoamericanos. Sostenibilidad e Indicadores. ALMERIA.
- Botta, G.F., A. Tolon- Becerra, X. Lastra-Bravo & M. Tourn.** 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil & Tillage Research* 110: 167-174.
- Cisneros, J., G. Cantero, J. Marcos, A. Degioanni, E. Bricchi, O. Giayetto, C. Cholaky, E. Bonadeo, G. Cerioni & M. Uberto.** 1998. Performance of a wing subsoiler adaptable to common use machinery. In: Proceedings of the IV CADIR (Argentine Congress on Agricultural Engineering), 1: 128-136.
- Daddow, R.L & G.E. Warrington.** 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. USDA-FS, Watershed Systems Development Group Rep. Fort Collins, Co. 162 pp.
- Dexter, A.R. & G. Richard.** 2009. Tillage of soils in relation to their bi-modal pore size distributions. *Soil & Tillage Research* 103: 113-118.
- Erenstein, O.** 2002. Review: Crop residue mulching in tropical and semi-tropical countries: An evaluation of residue availability and other technological implications. *Soil & Tillage Research*. 67: 115-133.
- Ferreras L. A., J.J. De Battista, A. Ausilio & Pecorari, C.** 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesq. agropec. bras., Brasília*. 36 (1): 161-170.
- Guérif, J., G. Richard, C. Durr, J.M. Machet, S. Recous & J. Roger-Estrade,** 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil & Tillage Research*. 61: 13-32.
- Hilbert, J.A. & M.O. Tesouro.** 2002. Curved subsoiler field performance and draft requirement. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (Argentina)* 30:14-23.
- Hipps, N.A. & D.R. Hodgson.** 1988. Residual effects of a slant-legged subsoiler on same soil physical conditions and the root growth of spring barley. *J. Agric. Sci.* 110:481-489.
- Jorajuria, D., L. Draghi, & A. Aragon.** 1997. The effect of wheel load on the distribution of soil compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium* pasture. *Soil and Tillage Research*. 41: 1-12
- Kirschenmann, F.** 2010. Alternative agriculture in an energy- and resource-depleting future. *Renew. Agric. Food Syst.* 25: 85-89.
- Lipiec, J., J.K. Słowiń-Jurkiewicz, & A.A. Nosalewicz.** 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil & Tillage Research*. 89: 210-220.
- Melero, S., M. Panettieri, E. Madejon Gómez, H. Macpherson, F. Moreno & J.M. Murillo.** 2011. Implementation of chiselling and mouldboard ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: Effect on soil quality. *Soil & Tillage Research*. 112: 107-174.
- Millennium Ecosystem Assessment,** 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- Sasal, M.C., A.E. Andriulo, & M.A. Taboada.** 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil & Tillage Research*. 87: 9-18.
- Secco D. & D.J. Reinert** 1997. Efeitos imediato e residual de escarificadores em Latossolo

Vermelhoescuro sob PD. Engenharia Agrícola. 16 (3): 52-61.

Soil Survey Staff. 2003. Keys to Soil Taxonomy. Ninth Edition. USDA – Natural Resources Conservation Service, 232 p.

Stengel, P. 1979. Utilization de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Ann. Agron. 30 (1): 27-51.

Swardji, P. & P.L. Eberbach 1998. Seasonal changes of physical properties of an Oxic Paleustalf (Red

Kandosol) after 16 years of direct drilling on conventional cultivation. Soil Tillage Research. 49: 65–77.

Taboada, M.A., F.G., Micucci, D.J. Cosentino, & R.S. Lavado, 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the rolling pampa of Argentina. Soils and Tillage Research 49: 57-63.

Unger, P.W. 1993. Paratill effects on loosening of a Torrertic Paleustoll. Soil Tillage Res. 26:1–9.