

DESCOMPACTACIÓN DE SUELOS EN SIEMBRA DIRECTA: EFECTOS SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y EL CULTIVO DE MAÍZ

ÁLVAREZ CARINA ROSA; TABOADA MIGUEL ÁNGEL; BUSTINGORRI CAROLINA;
GUTIÉRREZ BOEM & FLAVIO HERNÁN

Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453 (1417), Buenos Aires, Argentina.
E-mail: alvarezc@agro.uba.ar

Recibido: 00/00/00

Aceptado: 00/00/00

RESUMEN

Los suelos manejados con siembra directa presentan valores de resistencia a la penetración y de densidad aparente en superficie mayores que los suelos laboreados. La utilización de descompactadores puede ser una alternativa para aliviar dicha compactación. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1- evaluar el efecto de la descompactación en siembra directa sobre las algunas propiedades físicas del suelo a siembra y cosecha del cultivo de maíz; 2- determinar el efecto de la descompactación sobre el desarrollo de las raíces, el rendimiento del cultivo de maíz y sus componentes. Durante la campaña 2004/05 se llevaron a cabo tres experimentos en las localidades de Junín, San Gregorio y Chivilcoy. El diseño experimental fue de bloques completos con tres repeticiones. Los tratamientos evaluados fueron: testigo (siembra directa continua) y descompactado (pasaje de descompactador entre 36-42 cm de profundidad). A siembra y cosecha se determinó la densidad aparente, la humedad, la resistencia a la penetración y la infiltración. A floración se evaluó la abundancia radical, la radiación interceptada y el índice de verdor (SPAD). A cosecha se determinó el rendimiento y sus componentes. El tratamiento descompactado presentó un importante aumento de la tasa de infiltración a la siembra ($P<0,05$), sin embargo estas diferencias no fueron significativas a cosecha. La resistencia a la penetración a la siembra en el tratamiento descompactado respecto del testigo fue un 54%, 28% y 42% menor en Junín, San Gregorio y Chivilcoy, respectivamente ($P<0,05$). La abundancia radical presentó diferencias entre tratamientos en Junín y Chivilcoy ($P<0,05$). El rendimiento del tratamiento descompactado mostró un incremento relativo del 6,5% como promedio de todos los sitios ($P<0,05$). Esto coincidió con un 3% más de intercepción de radiación en floración ($P<0,05$). El incremento de rendimiento debido a la descompactación estuvo positivamente relacionado con la densidad aparente original de cada sitio. Si bien se observaron cambios que mejorarían la economía del agua, estos no tuvieron gran impacto sobre el rendimiento debido a la condición hídrica favorable durante la campaña evaluada. Es necesario realizar un mayor número de ensayos abarcando un rango más amplio de condiciones hídricas y de compactación de suelo.

Palabras clave.

SOIL ALLEVIATION IN DIRECT DRILLING SYSTEMS: EFFECT ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES AND MAIZE CROP

ABSTRACT

No-tilled soils have higher penetration resistances and bulk density values than tilled soils. Shallow compaction may be alleviated using deep tillage practices. The objectives of this study were to determine the effects of soil alleviation on: 1- soil physical properties at maize sowing and harvest, 2- root abundance, maize yield and its components. Three experiments were conducted during the 2004/05 growing season. The experiments had a complete block design, with 2 treatments (control and deep-tilled) and 3 replicates, and were located at Junín, San Gregorio and Chivilcoy. Soil bulk density, soil water content, soil penetration resistance and infiltration rate were determined at maize sowing and harvest. At flowering maize root abundance, intercepted photosynthetic active radiation and leaf greenness were determined. Additionally, yield and its components were measured. Soil alleviation increased infiltration rate at sowing ($P<0,05$), but there were no differences at harvest. Soil alleviation reduced penetration resistances at sowing by 54%, 28%, 42% at Junín, San Gregorio and Chivilcoy, respectively ($P<0,05$). Deep tillage increased root abundance at flowering at Junín and Chivilcoy ($P<0,05$). Maize yield showed a positive and statistically significant increase with soil alleviation. However, its magnitude was only 6,5% more than control yield. This result was in accordance with a 3% increase in intercepted photosynthetic active radiation. Yield response to subsoiling was positively related with the original soil bulk density at each site. Although the measured changes might improve water use efficiency, little impact on yield was observed due to a relatively humid cropping season. More research is needed in order to establish crop response in a wide range of water availability and soil compaction conditions.

Key words. Soil alleviation, direct drilling, maize, yield, root growth.

INTRODUCCIÓN

La Pampa Ondulada, con una superficie de alrededor de 5 Mha, comprende una parte importante de los suelos más productivos del país. Los mismos difieren en su textura superficial, presentando, en términos generales, altos contenidos de limo (Salazar Lea Plaza & Moscatelli, 1989). Esta región posee la historia agrícola de más larga data en el país, dominando en la actualidad los planteos de agricultura continua con cultivos como soja de primera, maíz y trigo-soja de segunda. Los suelos presentan procesos de erosión hídrica (Michelena *et al.*, 1988; SAGyP-CFA, 1995), especialmente en las cuencas de los ríos Arrecifes, Carcarañá y el arroyo del Medio y una disminución importante de sus niveles de materia orgánica (Álvarez, 2001). Hacia mediados de la década de los '90 se produjo la adopción de los sistemas de siembra directa por parte de los productores de la región. En la actualidad, la superficie agrícola manejada con este sistema supera el 50% (INDEC, 2005). Ello obedeció a un conjunto de causas, entre las que sobresalen las de índole económica, como el incremento del precio del gas-oil y la disminución del precio de los herbicidas. Asimismo, permitió aumentar la capacidad operativa y la escala de trabajo.

Los suelos manejados con siembra directa suelen presentar valores de resistencias a la penetración más elevados y, en algunos casos, aumento de la densidad aparente (Álvarez *et al.*, 2004; Díaz Zorita *et al.*, 2002). Ello es atribuible a la ausencia de remoción, sumado al efecto compactante derivado del pasaje de maquinarias (Botta *et al.*, 2004). Ambos parámetros de fertilidad física se relacionan con la aptitud de los perfiles de suelo para permitir el crecimiento de las raíces de los cultivos en forma no limitante para los rendimientos (Glinski & Lipiec, 1990). El crecimiento radical se ve impedido cuando ambos parámetros exceden umbrales reconocidos, que para el caso de la resistencia a la penetración es en torno a 2-3 MPa (Glinski & Lipiec, 1990; Gupta & Allmaras, 1987). Las propiedades físicas representan un componente principal de la evaluación integral de la calidad de los suelos (Hussain *et al.*, 1999). Estas propiedades están, en general, determinadas por la organización estructural de los suelos, o dicho de otro modo, su estado de agregación caracterizado por la forma, estabilidad y resiliencia de la estructura (Kay, 1990). Las distintas formas que toman los agregados determinan la distribución de tamaño y la tortuosidad de los poros. De allí que la caracterización de la entrada de agua al suelo (*i.e.* tasa de infiltración) sea también un reconocido indicador de calidad de los mismos. Los poros con diámetros > 100 µm son esenciales para permitir la libre elongación de las raíces de los cereales (Gibas & Reid, 1988). Cuando estos poros no existen o son insuficientes, las raíces deben mover las partículas de la fase sólida, la cual no debe ofrecer elevadas resis-

tencias a la penetración (Gibas & Reid, 1988; Glinski & Lipiec, 1990). El maíz es uno de los cultivos más sensibles al déficit hídrico, debido a su acotado período crítico en momentos de alta demanda atmosférica (Sadras & Calviño, 2001). Las raíces de maíz responden negativamente a la presencia de capas compactas en el subsuelo, pero no siempre con impacto sobre los rendimientos (Díaz Zorita, 2000; Erbach *et al.*, 1986; Logsdon *et al.*, 1999). La percepción sobre la existencia de compactación y/o endurecimiento del suelo por el medio productivo ha llevado a proponer la disrupción mecánica de capas compactadas con implementos de labranza profunda (*e.g.* "para-till", "para-plov"). Los resultados son muy claros en lo que respecta a la resistencia del suelo, la cual suele experimentar descensos significativos, pero no sucede así en lo que respecta a los efectos de la descompactación sobre el crecimiento de las raíces y los rendimientos de los cultivos (Díaz-Zorita, 2000; Hamilton-Manns *et al.*, 2002).

No existe a nivel local, suficiente valoración de los efectos de la descompactación sobre el cultivo de maíz. Mucho menos, acerca de la duración de los efectos de la práctica de descompactación sobre las propiedades edáficas a lo largo del ciclo del cultivo. Los objetivos del presente trabajo fueron: 1- evaluar el efecto de la descompactación del suelo en planteos de siembra directa sobre algunas propiedades físicas a siembra y cosecha, con el fin de cuantificar la magnitud y perdurabilidad de los cambios; 2- determinar el efecto de la descompactación sobre el desarrollo de las raíces en floración, el rendimiento y sus componentes en el cultivo de maíz en la Pampa Ondulada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Suelos y tratamientos

Se desarrollaron tres ensayos en las localidades de Junín (Buenos Aires, 34° 35' S 61° 01' O), San Gregorio (Santa Fe, 34° 17' S 62° 06' O) y Chivilcoy (Buenos Aires, 34° 54' S 60° 02' O) durante la campaña 2004/05. En las tres situaciones se aplicó un diseño de bloques completos al azar, con dos tratamientos: 1- testigo y 2- descompactado con tres repeticiones cada uno. En la Tabla 1 se presenta información detallada del manejo del suelo y cultivo, de las condiciones experimentales y de la labor de descompactación. En los tres sitios experimentales se venían realizando las rotaciones típicas de la zona: trigo/soja de segunda, maíz o trigo/soja de segunda, maíz, soja de primera. Sólo en la localidad de Junín los últimos años se había realizado soja de primera con cierta continuidad. El antecesor en todos los casos fue soja de primera o segunda. La labor de descompactación se realizó a una profundidad promedio de 40 cm (36 a 42 cm). Los distintos cultivos fueron fertilizados con fósforo y nitrógeno con el fin de anular posibles diferencias en la disponibilidad de nutrientes derivadas del tratamiento de descompactación.

Tabla 1. Principales características de suelos y manejo de los sitios.

Table 1. Main soil and management characteristics of the experimental sites.

	Junín	San Gregorio	Chivilcoy
Años desde última pastura	25	12	80
Años en siembra directa	4	12	8
Tipo de suelo	Hapludol Típico	Hapludol Típico	Argiudol Típico
Clase textural	Franco arenoso	Franco	Franco
Arcilla (g kg ⁻¹)	160	190	185
Limo (g kg ⁻¹)	270	380	480
Materia Orgánica 0-20 cm (g kg ⁻¹)	27	35	28
Labor de descompactación (días antes de siembra)	60	30	75
Implemento	Escarificador	Escarificador	Paratill
Distancia entre púas (cm)	80-90	70	52
Híbrido	Pioneer 31b18	DKB 6	DKB 682
Fecha de siembra	10/10/04	20/09/04	02/11/04
Densidad de siembra (plantas ha ⁻¹)	80.000	80.000	80.000
Distancia entre hileras (cm)	52	52	70
Fósforo adicionado (kg P ha ⁻¹)	18	20	36
Nitrógeno adicionado (kg N ha ⁻¹)	94	110	145

Determinaciones

En el momento de la siembra se extrajeron muestras compuestas de 18 submuestras de suelo (0-20 cm) a las que se les determinó el contenido de materia orgánica total (Walkley y Black, Allison, 1965) y el análisis granulométrico por el método de la pipeta (Gee & Or, 2002). Estas muestras fueron caracterizadas en cuanto a su compactabilidad en ensayos Proctor (ASTM, 1982). Ello permitió determinar la humedad edáfica crítica y la densidad aparente máxima de cada suelo.

En los momentos de siembra y de cosecha del cultivo de maíz se determinaron las siguientes propiedades edáficas:

- a- infiltración utilizando un método rápido (USDA, 1999). Para ello, se introduce un cilindro de 15 cm de diámetro en el suelo. Se adiciona una primera lámina de agua de una pulgada de espesor, con el objetivo de saturar la primera capa de suelo. Posteriormente, se agrega una segunda lámina, registrando el tiempo transcurrido hasta que la misma penetra completamente en el suelo.
- b- densidad aparente por el método del cilindro (6,8 cm de diámetro y 6 cm altura). Se realizó una determinación por parcela en superficie y a los 15 cm de profundidad.
- c- resistencia a la penetración de 0-40 cm con penetrómetro de golpe, con punta cónica de 60° (Burke *et al.*, 1986) a intervalos de 5 cm, realizándose 2 determinaciones por parcela.
- d- contenido hídrico gravimétrico (0-20 y 20-40 cm) mediante secado en estufa a 105 °C hasta peso constante, tomándose una muestra compuesta en cada parcela.

En floración se realizó una calicata por parcela, con la planta en el centro de la misma y se evaluó el crecimiento radical utilizan-

do el método de la cuadrícula. La cuadrícula (50 cm x 100 cm) tenía divisiones internas de 5 cm x 5 cm. De esta forma se evaluó la distribución horizontal y vertical de las raíces (Manichon, 1987). Se utilizó una escala de 0 (ausencia de raíces) a 5 (máxima abundancia). En dos de los sitios (Junín y San Gregorio) se determinó el porcentaje de radiación interceptada a partir de la radiación fotosintéticamente activa por sobre y debajo del canopeo (5 lecturas por parcela). Para ello, se utilizó un radiómetro lineal de 1 m (LICOR LI-191SA). En estos mismos sitios se midió la intensidad de color verde con un clorofilómetro (Minolta SPAD-502) en la hoja inmediatamente superior a la de la inserción de la espiga en 20 plantas consecutivas dentro de cada parcela.

En el momento de la cosecha se determinó el rendimiento y sus componentes (número de granos y peso de 1.000 granos). Para ello, se cosecharon manualmente 4 metros lineales en cada parcela. Para determinar peso de 1.000 granos, se pesaron 3 submuestras de 100 semillas. El rendimiento ha sido expresado en peso seco, procediéndose a secar las muestras en estufa a 60 °C hasta peso constante. Se registraron las precipitaciones durante el barbecho y el ciclo del cultivo.

Estadística

Los resultados fueron analizados a través de análisis de varianza (ANOVA). Cuando se encontraron diferencias estadísticas significativas se aplicó la prueba de contraste de medias ($P < 0,05$). Cuando no se cumplía el supuesto de homogeneidad de varianzas, las variables fueron transformadas para su análisis (Kuehl, 1994). El efecto de los tratamientos sobre las variables edáficas y la distribución de las raíces se analizó sitio por sitio. En el caso de rendimiento se analizaron todos los sitios experimentales en conjunto previa verificación de homogeneidad de varianza entre los mismos (Petersen, 1994).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto sobre las propiedades edáficas y su perdurabilidad

La tasa de infiltración de agua presentó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos en el momento de la siembra. Estas diferencias disminuyeron al momento de la cosecha, y no tuvieron significancia estadística (Tabla 2). Ello muestra una baja perdurabilidad de la práctica de descompactación sobre el ingreso de agua al perfil de suelo. Este efecto de corto plazo podría atribuirse a que la macroporosidad creada por el implemento mecánico fue inestable, y el efecto se revirtió por el acomodamiento de los agregados y de las partículas del suelo. Cabe destacar que los valores de infiltración presentaron una alta variabilidad, hecho demostrado por los elevados errores estándar de las medias. El suelo de Junín (Hapludol típico) se caracterizó por presentar el menor impacto, en términos relativos, de la descompactación sobre la infiltración. El mayor contenido de arena de este suelo (Tabla 1) le confiere elevada macroporosidad de origen textural. En consecuencia, fue menor el efecto del manejo sobre la infiltración por efecto de la descompactación. Hamza & Anderson (2003) observaron que la perdurabilidad de la práctica de descompactación profunda aumentaba con el agregado de yeso debido al efecto agregante que permitía retrasar la consolidación del suelo.

En los tres sitios experimentales, la densidad aparente no mostró diferencias estadísticas significativas entre tratamientos para ninguna de las profundidades evaluadas (Tabla 3). En superficie los valores de densidad fueron significativamente inferiores que en profundidad independientemente del tratamiento. Estos resultados indican que la densidad aparente fue un parámetro relativamente insensible a la práctica de descompactación. Ello coincide con otros autores, que también detectaron cambios en la resistencia a la penetración, pero no en la densidad aparente en ensayos de tránsito creciente (Botta

et al., 2004, 2005) y también en experiencias de descompactación profunda (Hamilton-Manns *et al.*, 2002; Carter *et al.*, 1996). La densidad aparente, varía en función de la textura del suelo y el contenido de materia orgánica, entre otros factores (Gupta & Allmaras, 1987). En consecuencia, al comparar situaciones que presentan distinta compactación inicial se sugiere utilizar valores de densidad aparente relativa, calculada como la densidad aparente original del sitio respecto de la densidad máxima del suelo estimada a través del ensayo Proctor. Para las condiciones estudiadas la densidad máxima fue de $1,51 \text{ Mg m}^{-3}$ (humedad: 21%g) para Junín, $1,55 \text{ Mg m}^{-3}$ (humedad: 17%g) para San Gregorio y $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ (humedad: 22%g) para Chivilcoy. Los valores de densidad relativa fueron 82%, 77% y 79%, respectivamente. Los valores relativos de densidad iniciales de los sitios fueron siempre inferiores a 90%, valor por encima del cual se han observado descensos en los rendimientos de cultivo de trigo (Carter, 1990).

Las variaciones en la resistencia a la penetración deben ser consideradas en conjunto con el contenido hídrico edáfico debido a la relación existente entre ambos parámetros. En los distintos ensayos, no se registraron diferencias de significancia estadística en la humedad entre tratamientos, en los momentos de siembra o de cosecha (0-20 cm y 20-40 cm). Los sitios de Junín y Chivilcoy presentaron al momento de la siembra niveles de humedad promedio de 0-40 cm de 14,5%g y 25,1%g, respectivamente. En el momento de la cosecha estos niveles fueron más altos (21,8%g en Junín y 28,2%g en Chivilcoy). En San Gregorio los niveles hídricos fueron similares a la siembra y a la cosecha (25,2%g).

La similitud en los valores de humedad entre tratamientos permitió realizar una comparación directa de la resistencia a la penetración. Este parámetro presentó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre el testigo y descompactado en todos los sitios evaluados al momento de la siembra (Figura 1A). No se observó nunca interacción entre resistencia y profundidad. La

Tabla 2. Infiltración de los tratamientos a siembra y a cosecha en los tres sitios bajo estudio. Letras diferentes indican diferencias significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos para cada fecha dentro de cada sitio experimental. Se indican los errores estándar.

Table 2. Infiltration rate at sowing and harvest for the different treatments and sites. Different letters indicate significant statistically differences between treatments ($P < 0.05$).

Infiltración (mm h^{-1})	Junín		San Gregorio		Chivilcoy	
	Siembra	Cosecha	Siembra	Cosecha	Siembra	Cosecha
Testigo	28±9 a	44±20 a	99±38 a	44±6 a	24±5 a	46±36 a
Decompactado	163±30 b	115±24 a	1.273±255 b	81±36 a	455±162 b	63±27 a

Tabla 3. Densidad aparente de los tratamientos a siembra y a cosecha en los tres sitios bajo estudio. Se indican los errores estándar.
Table 3. Soil bulk density at sowing and harvest for the different treatments and depths. Standard errors are indicated.

Densidad (t m ⁻³)		Junín		San Gregorio		Chivilcoy	
		Siembra	Cosecha	Siembra	Cosecha	Siembra	Cosecha
Testigo	0 cm	1,14 ± 0,01	1,13 ± 0,03	1,09 ± 0,16	1,03 ± 0,17	1,05±0,05	1,21±0,02
	15 cm	1,33 ± 0,05	1,25 ± 0,05	1,33 ± 0,12	1,37 ± 0,12	1,28±0,02	1,35±0,04
Descompactado	0 cm	1,16 ± 0,02	1,13 ± 0,02	1,02 ± 0,15	1,06 ± 0,23	0,98±0,12	1,08±0,11
	15 cm	1,29 ± 0,02	1,25 ± 0,02	1,32 ± 0,11	1,35 ± 0,11	1,18±0,02	1,39±0,01
ANOVA							
Tratamiento		ns	ns	ns	ns	ns	ns
Profundidad		P<1%	P<1%	P<1%	P<1%	P<3%	P<1%
Tratamiento x profundidad		ns	ns	ns	ns	ns	ns

resistencia aumentó con la profundidad en San Gregorio y Chivilcoy. La diferencia entre los tratamientos persistió en todos los sitios hasta la cosecha (Figura 1B). En Junín los valores de resistencia a la penetración medidos a cosecha fueron inferiores que a la siembra. Ello se debe a los distintos contenidos de humedad en ambos momentos. La resistencia a la penetración presentó una mayor sensibilidad que la densidad aparente para indicar diferencias entre tratamientos. En Junín, la resistencia del perfil hasta 40 cm fue 54% menor en el tratamiento descompactado en el momento de la siembra, mientras que en San Gregorio fue 28% inferior y en Chivilcoy 42% inferior. Los límites críticos citados en la bibliografía varían desde 1,5 MPa como límite crítico inferior a partir del cual el crecimiento disminuye en un 50% y como límite crítico superior 3 MPa a partir del cual el crecimiento radical cesa en el cultivo de maíz (Boone *et al.*, 1986). Sólo en Chivilcoy, con condiciones de buen contenido hídrico, los valores obtenidos en el testigo superan ampliamente el límite de 3 MPa, especialmente a la profundidad del horizonte Bt. Cabe destacar que el ángulo de la punta del penetrómetro utilizado en estos ensayos es de 60°, mientras que el ángulo estándar ASAE (1992) es de 30°.

Vorhees *et al.* (1975) han descrito que al aumentar el ángulo del cono de 10° a 30° la resistencia a la penetración decrece, debido a una menor fricción entre el suelo y la superficie del cono. Por el contrario, cuando el ángulo aumenta por encima de 30°, incrementa la fricción dentro de la masa de suelo, resultando en valores de resistencia a la penetración crecientes. La resistencia a la penetración de una punta de 60° con respecto a una de 30° de ángulo, para un valor de densidad aparente de 1,1 t m⁻³, es aproximadamente un 35% superior, pudiéndose suponer una

sobrevaloración de los valores de resistencia a la penetración presentados en este trabajo.

Efecto sobre el cultivo de maíz

Los sitios de estudio mostraron diferentes reacciones de las raíces de maíz a la descompactación. En San Gregorio no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, pero sí entre profundidades. No existió interacción entre ambos factores (Figura 2). Por el contrario, en Junín y Chivilcoy la abundancia radical presentó interacción significativa "tratamiento x profundidad" (P<0,05). En Junín se registraron diferencias en abundancia radical a favor del tratamiento descompactado entre 15 y 30 cm (Figura 2). En Chivilcoy estas diferencias (testigo < descompactado) tuvieron lugar en los estratos 5-35 cm y 60-85 cm. Ello demuestra que la práctica de descompactación permitió una exploración radical por debajo del horizonte Bt, en este sitio. O sea, permitió una mayor exploración no sólo en la zona donde se realizó la descompactación, sino por debajo de la misma.

El efecto generado por el horizonte Bt cobraría importancia en años con déficit hídrico, ya que restringe la capacidad de exploración y por lo tanto, la autonomía del cultivo en relación a las precipitaciones (Glinski & Lipiec, 1990). Es importante destacar que esta restricción no se produce en todos los cultivos. Recientes resultados de Micucci & Taboada (2006) indican que las raíces de soja exploran principalmente los primeros 30 cm de los perfiles hasta donde comienzan los horizontes argílicos. No obstante, Dardanelli *et al.* (2003) hallaron también que estos horizontes no necesariamente impiden el crecimiento de raíces de soja, sino que cambian su patrón de dis-

Resistencia a la Penetración (MPa)

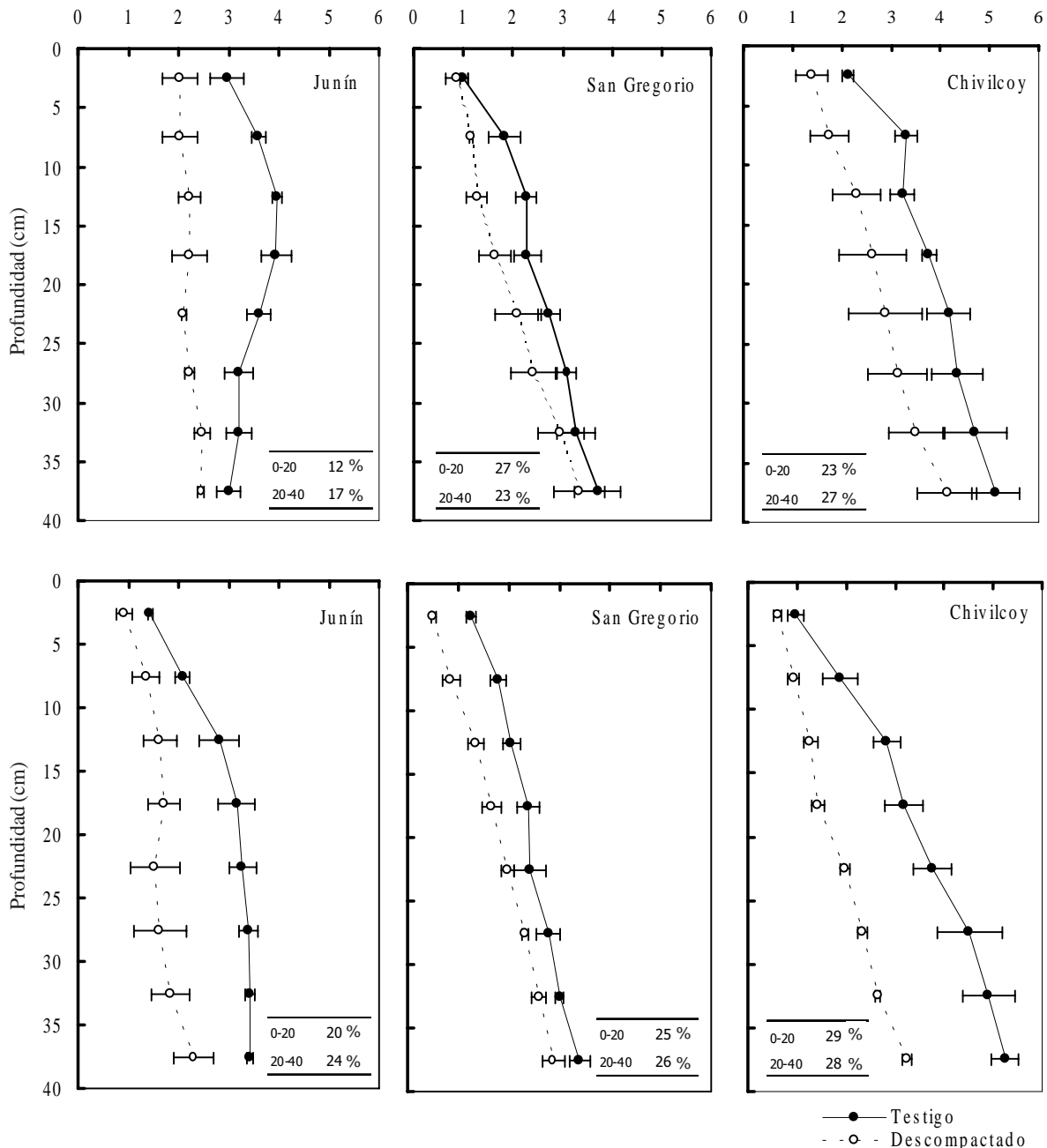


Figura 1. Resistencia a la penetración hasta 40 cm de profundidad, evaluada a intervalos de 5 cm. A: siembra, B: cosecha del cultivo de maíz, en los tres sitios bajo estudio. En las tablas insertas se presenta el contenido de humedad % g promedio de ambos tratamientos para la profundidad de 0 a 20 y de 20 a 40 cm medidas en forma simultánea a la resistencia a la penetración. Las barras indican el error estándar.

Figure 1. Soil penetration resistance up to 40 cm depth, measured at 5-cm layers. A: at sowing, B: at maize harvest for all experimental sites. Insets show the mean gravimetric water content (%) of the treatments for 0-20 and 20-40 cm depth measure simultaneously with penetration resistance. Bars indicate standard error.

Figura 2. Distribución de raíces hasta 1 m de profundidad y 25 cm a cada lado de la planta, en cuadrículas de 5 por 5 cm para cada sitio y tratamiento. Escala desde 0 (ausencia) a 5 (máxima abundancia).

Figure 2. Root distribution in all experimental sites and treatments up to 1 m depth and 25 cm at each side of maize plant (5 cm by 5 cm). Scale ranges from 0 (absence) to 5 (maximum abundance).

tribución, aprovechando las grietas interpedales (“clumping”).

Las precipitaciones durante el ciclo del cultivo en Junín (Octubre-Febrero) fueron de 529 mm, en San Gregorio (Septiembre-Febrero) 615 mm y en Chivilcoy (Noviembre-Febrero) 432 mm. Asimismo, las lluvias durante el barbecho (Junio hasta siembra según la localidad), fueron de 126, 153 y 123 mm para Junín, San Gregorio y Chivilcoy, respectivamente. El análisis estadístico conjunto del rendimiento de los tres sitios mostró efectos significativos de sitio y de tratamiento ($P < 0,05$), pero ausencia de interacción entre ambos factores (Figura 3 A). En Chivilcoy hubo rendimientos medios menores ($10.676 \text{ kg ha}^{-1}$) que en San Gregorio ($13.218 \text{ kg ha}^{-1}$) y Junín ($13.164 \text{ kg ha}^{-1}$). A ello pudo haber contribuido la diferencia de precipitaciones y la fecha de siembra más tardía, entre otros factores. También se encontró una respuesta positiva a la descompactación. La magnitud de esta fue en promedio de 785 kg ha^{-1} expresado en materia seca, siendo máxima en Junín y mínima en Chivilcoy. En términos relativos, esta diferencia sólo representa un incremento porcentual de 6,5% respecto del rendimiento del testigo. El rendimiento estuvo relacionado con el número de granos m^{-2} (Figura 3B, $R^2=0,85$, $P<0,01$), no presentando asociación con el peso de los mismos ($R^2=0,06$,

$P=0,32$). Estos resultados son en parte explicados por la mayor radiación interceptada a floración en el tratamiento descompactado, evaluado en Junín y San Gregorio (Tabla 4). La diferencia entre tratamientos fue de alrededor de un 3% más de intercepción en el descompactado como promedio de ambos sitios. Por otra parte, el índice de verdor determinado con el SPAD medido a floración no presentó diferencias estadísticas entre tratamientos. Los resultados de nuestros experimentos concuerdan con Sadras *et al.* (2005) que observaron que la descompactación produjo mayor intercepción de radiación, mientras que los valores de SPAD no fueron modificados por el tratamiento de descompactación.

Los valores de densidad aparente originales de cada sitio fueron $1,24$; $1,21$ y $1,17 \text{ t m}^{-3}$ para Junín, San Gregorio y Chivilcoy. Estos valores se relacionaron positivamente con el incremento de rendimiento producto de la labor de descompactación. Los incrementos calculados como la diferencia del rendimiento entre descompactado y testigo, fueron de 1.552 ; 820 y 84 kg ha^{-1} , respectivamente.

De los resultados se desprende una mejora en la infiltración en todos los sitios, y un mayor crecimiento radical en algunos de ellos. Ambas propiedades favorecerían la economía del agua por parte del cultivo debido al aumento de captación o ingreso de agua al perfil, y una

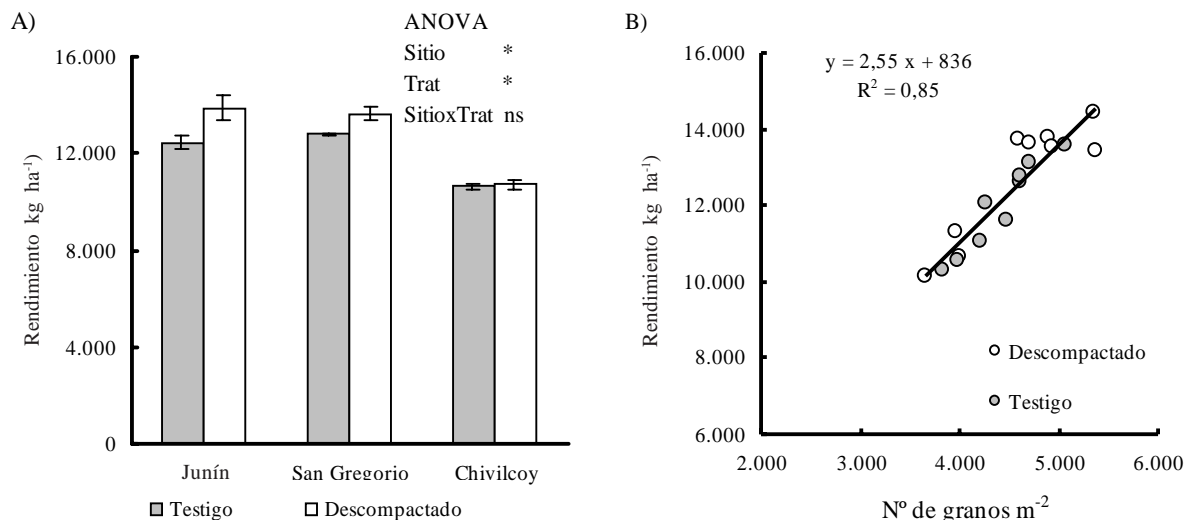


Figura 3. A: Rendimiento en los distintos sitios y tratamientos. Valores expresados en materia seca. Las barras indican el error estándar. El análisis estadístico corresponde al análisis conjunto de los sitios. B: Relación entre el rendimiento y el número de granos para el todos los sitios.

Figure 3. A: Grain yields for the different sites and treatments, expressed in dry matter. Bars indicate standard error. Statistical analysis was performed considering all sites together. B: Relationship between grain yield and grain number for all sites.

Tabla 4. Radiación interceptada (%) e índice de verdor en floración para Junín y San Gregorio para los tratamientos evaluados.

Table 4. Intercepted radiation (%) and SPAD readings at flowering at Junín and San Gregorio for the different treatments.

Sitio	Tratamiento	Radiación interceptada (%)	Índice de verdor
Junín	Testigo	93,4±3,82	58,0±1,8
	Descompactado	95,7±2,64	58,8±1,2
San Gregorio	Testigo	80,4±1,88	56,4±1,9
	Descompactado	83,4±0,69	54,9±0,7
ANOVA			
Sitio		P < 0,01	P = 0,14
Tratamiento		P = 0,02	P = 0,80
Sitio x Tratamiento		P = 0,69	P = 0,48

mayor exploración radical, que permite el acceso a más recursos. Sin embargo, los incrementos de rendimiento no han sido tan importantes en términos relativos.

Sadras *et al.* (2005), a partir de experimentos propios y de otros autores, concluyen que aunque se produzcan cambios en el grado de compactación del suelo y más aún alteraciones en la abundancia radical de los cultivos, ello no implica necesariamente cambios en la producción. Ya que si hay suficientes recursos disponibles, por ejemplo precipitaciones adecuadas, los beneficios inherentes a la práctica de descompactación no se ponen de manifiesto.

La estación de crecimiento en la que se desarrollaron nuestros experimentos fue relativamente húmeda.

La oferta hídrica cubrió adecuadamente la evapotranspiración del cultivo. Asimismo, no debería descartarse una mayor disponibilidad de nitrógeno en el tratamiento descompactado como consecuencia de un incremento en la mineralización y descomposición. Esta diferencia puede no haberse compensado con la fertilización debido a los altos rendimientos logrados en la campaña. En conclusión, puede inferirse que en años con adecuada disponibilidad hídrica, como el evaluado, la práctica de descompactación tendrá un bajo impacto sobre el rendimiento y, probablemente, una escasa ventaja económica, si se considera el costo de la labor. Estos resultados deberán ser corroborados en un rango más amplio de condiciones hídricas y distintos grados de compactación, así como continuar con la evaluación de la perdurabilidad de la práctica de descompactación en los sitios estudiados.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue subsidiado con el PICT 12241 (2002), de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica. Agradecemos a Bernardo Romano, Patricia Rey, Vicente Martín Gerde y Javier Alasia por la ayuda en la conducción de los ensayos.

BIBLIOGRAFÍA

- Allison, LE. 1965. Organic carbon. Pp. 1367-1378 *In*: CA Black (ed.). *Methods of Soil Analysis (Part 2) Chemical and Microbiological Properties*. American Society of Agronomy Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Álvarez, CR; FH Gutierrez Boem; MA Taboada; P Prystupa; JF Ocampo *et al.* 2004. Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo bajo distintos manejos en el norte de Buenos Aires. Pp.238. *Actas XIX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo*. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- Álvarez, R. 2001. Estimation of carbon losses by cultivation from soils of the Argentine Pampa using the Century Model. *Soil Use Manag.* 17(2):62-66.
- ASAE. 1992. American Society of Agricultural Engineers Standards. ASAE Editions (eds). St Joseph, MI, USA. 781 pp.
- ASTM. 1982. Standard test methods for moisture relations using a 5.5 lb (2,5 kg) hammer and 12 inch (304,8 mm) drop. Pp. 836-842 en: ASTM (ed.), *ASTM Standards in Building Codes*. Philadelphia, USA.
- Boone, FR; KH van der Werf; B Kroesbergen; BA ten Hag & A Boers. 1986. The effect of compaction of the arable layer in sandy soil on the growth of maize for silage. I. Mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 34: 155-171.

- Botta, GF; D Jorajuria; R Balbuena & H Rosatto. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil Till. Res.* 78(1):53-78.
- Botta, GF; D Jorajuria; H Rosatto & C Ferrero. 2006. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Till. Res.* 86(1):9-14.
- Burke, W; D Gabriels & J Bouma (eds). 1986. Soil structure assessment. AA Balkema. Rotterdam, Netherlands. 92 pp.
- Carter, MR; DA Holstrom; LM Cochrane; PC Brenton; JA van Roestel *et al.* 1996. Persistence of deep loosening of natural compacted subsoils in Nova Scotia. *Can. J. Soil Sci.* 76(4): 541-547.
- Carter, MR. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.* 70: 425-433.
- Dardanelli, JL; MA Calmon; JW Jones; MP Andriani; MP Díaz & DJ Collino. 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *Trans. ASAE* 46:1265-1275.
- Díaz-Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Till. Res.* 54 (1):11-19.
- Díaz-Zorita, M; GA Duarte & JH Grove. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65 (1):1-18.
- Erbach, DC; RM Cruse; TM Crosbie; DR Timmons; TC Kaspar & KN Potter. 1986. Maize response to tillage-induced soil conditions. *Trans. ASAE* 29:690-695.
- Gee, GW & D Or. 2002. Particle-Size Analysis. Chapter 2.4. Pp. 255-293. In: JH Dane & GC Topp (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4: Physical Methods.* Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Gibbs, RJ & JB Reid. 1988. A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 8:123-149.
- Glinski, J & J Lipiec. 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots.* CRC Press Inc. Boca Raton, 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.
- Hamilton-Manns, M; CW Ross; DJ Horne & CJ Baker. 2002. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. *Soil Till. Res.* 68(2):109-119.
- Hamza, MA & WK Anderson. 2003. Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application on a compacted loamy sand soil contrasting with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 54(3):273-282.
- Hussain, I; KR Olson; MM Wander & DL Karlen. 1999. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Till. Res.* 50(3&4): 237-249.
- INDEC. 2005. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. www.indec.gov.ar.
- Kay, BD. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.* 12:1-52.
- Kuehl, RO. 1994. Diagnosing agreement between the data and the model. Chapter 4. Pp: 108-128 in: *Statistical Principles of Research Design and Analysis.* Duxbury Press. California, USA.
- Logsdon, SD; TC Kaspar & CA Cambardella. 1999. Depth-incremental properties under no-till or chisel management. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(1):197-200.
- Manichon, H. 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. Pp: 145-155 In: G Monnier & MJ Goss (eds). *Soil Compaction and Regeneration.* AA Balkema. Rotterdam, Netherlands.
- Michelena, RO; CB Irurtia; A Pittaluga; F Vavruska & ME de Sardi. 1988. Degradación de los suelos en el sector norte de la Pampa Ondulada. *Ci. Suelo* 6:60-66.
- Micucci, FG & MA Taboada. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86(2):152-162.
- Petersen, RG. 1994. Combined analysis of several experiments. Chapter 6 Pp. 205-391 In: RG Petersen (ed.). *Agricultural Field Experiments. Design and Analysis.* Marcel Dekker. New York, USA. 409 pp.
- Sadras, VO; GJ O'Leary & DK Roget. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91 (2&3):131-148.
- Sadras, V & A Calviño. 2001. Quantification of grain yield response to soil depth in soybean, maize, sunflower, and wheat. *Agron. J.* 93 (3):577-583.
- SAGyP-CFA. 1995. *La Degradación de las tierras en la República Argentina.* Alerta Amarillo. SAGyP. Buenos Aires. Argentina. 287 pp.
- Salazar, Lea; JC Plaza & G Moscatelli. 1989. *Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires.* Escala 1:500.000. SAGyP - INTA. Buenos Aires. Argentina. 527 pp.
- USDA. 1999. *Soil Quality Test Kit Guide.* USDA-Agriculture Research Service. SCS. USA. 82 pp.
- Voorhees, WB; DA Farell & WE Larson. 1975. Soil strength and aeration effects on root elongation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 39:948-953.