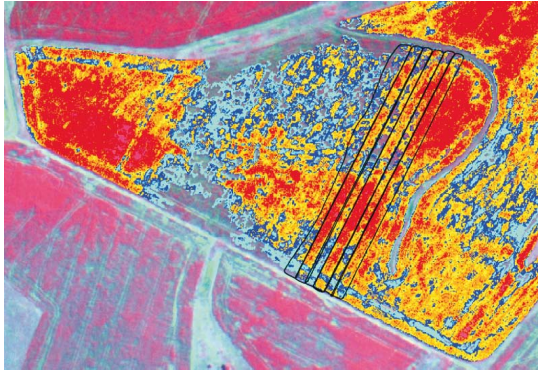
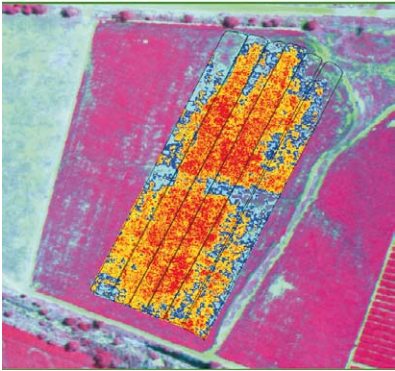




INSTITUTO
NACIONAL DE
INVESTIGACIÓN
AGROPECUARIA

URUGUAY



**DESCOMPACTACIÓN
SUB SUPERFICIAL DEL
SUELO EN SISTEMAS
DE AGRICULTURA CONTINUA
SIN LABOREO**

FEBRERO 2019

SERIE
FPTA-INIA

72

DESCOMPACTACIÓN SUB SUPERFICIAL DEL SUELO EN SISTEMAS DE AGRICULTURA CONTINUA SIN LABOREO

FPTA - 337

Responsable del proyecto:

Lic. Luciano Dabala¹

Equipo de trabajo:

Oswaldo Ernst²
Pilar Etchegoimberry²
Mónica Cadenazzi³
Ramiro Izaguirre²

Estudiantes que realizaron su trabajo final de grado en el marco del proyecto:

Santiago Barolín, Federico Ernst, Rodrigo Ferreira, Ma. del Rocío Krall, Ricardo Mozzaquatro, Ignacio Prieto, Miguel Raffo, Pablo Rivoir, Fernando Rostán.

¹ Asociación Uruguaya pro Siembra Directa

² Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. Departamento de Producción Vegetal. Facultad de Agronomía. Universidad de la República Oriental del Uruguay.

³ Experimental Dr. Mario A. Cassinoni. Departamento de Biometría, Estadística y Computación. Facultad de Agronomía. Universidad de la República Oriental del Uruguay.

Título: Descompactación sub superficial del suelo en sistemas de agricultura continua sin laboreo

Responsable técnico del proyecto: Lic. Luciano Dabala

Equipo técnico de trabajo:

Oswaldo Ernst
Pilar Etchegoimberry
Mónica Cadenazzi
Ramiro Izaguirre

Estudiantes que realizaron su trabajo final de grado en el marco del proyecto:

Santiago Barolín, Federico Ernst, Rodrigo Ferreira, Ma. del Rocío Krall, Ricardo Mozzaquatro, Ignacio Prieto, Miguel Raffo, Pablo Rivoir, Fernando Rostán

Imágenes de la tapa: obtenidas por “Agricultura por Ambiente”. IMAGEN MULTIESPECTRAL Banda 5-3-2 RGB Falso color compuesto. 12/02/2015.

Foto de la tapa. Diferencia de altura del cultivo de soja en respuesta a la descompactación: Ernst, F. y Rivoir P. (Febrero 2015)

Serie: FPTA N° 72

ISBN: 978-9974-38-419-4

© 2019, INIA

Editado por la Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología de INIA
Andes 1365, Piso 12. Montevideo, Uruguay
<http://www.inia.uy>

Quedan reservados todos los derechos de la presente edición. Este libro no se podrá reproducir total o parcialmente sin expreso consentimiento del INIA.

Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria

Integración de la Junta Directiva

D.M.T.V., Ph.D. José Luis Repetto - Presidente

Ing. Agr., Mag. Mariana Hill - Vicepresidenta



Ing. Agr. Jaime Gomes de Freitas

Ing. Agr. Jorge Peñaricano



Ing. Agr. Pablo Gorriti

Ing. Agr. Alberto Bozzo



FONDO DE PROMOCIÓN DE TECNOLOGÍA AGROPECUARIA

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA) fue instituido por el artículo 18° de la ley 16.065 (ley de creación del INIA), con el destino de financiar proyectos especiales de investigación tecnológica relativos al sector agropecuario del Uruguay, no previstos en los planes del Instituto.

El FPTA se integra con la afectación preceptiva del 10% de los recursos del INIA provenientes del financiamiento básico (adicional del 4o/oo del Impuesto a la Enajenación de Bienes Agropecuarios y contrapartida del Estado), con aportes voluntarios que efectúen los productores u otras instituciones, y con los fondos provenientes de financiamiento externo con tal fin.

EL FPTA es un instrumento para financiar la ejecución de proyectos de investigación en forma conjunta entre INIA y otras organizaciones nacionales o internacionales, y una herramienta para coordinar las políticas tecnológicas nacionales para el agro.

Los proyectos a ser financiados por el FPTA pueden surgir de propuestas presentadas por:

- a) los productores agropecuarios, beneficiarios finales de la investigación, o por sus instituciones.
- b) por instituciones nacionales o internacionales ejecutoras de la investigación, de acuerdo a temas definidos por sí o en acuerdo con INIA.
- c) por consultoras privadas, organizaciones no gubernamentales o cualquier otro organismo con capacidad para ejecutar la investigación propuesta.

En todos los casos, la Junta Directiva del INIA decide la aplicación de recursos del FPTA para financiar proyectos, de acuerdo a su potencial contribución al desarrollo del sector agropecuario nacional y del acervo científico y tecnológico relativo a la investigación agropecuaria.

El INIA a través de su Junta Directiva y de sus técnicos especializados en las diferentes áreas de investigación, asesora y facilita la presentación de proyectos a los potenciales interesados. Las políticas y procedimientos para la presentación de proyectos son fijados periódicamente y hechos públicos a través de una amplia gama de medios de comunicación.

El FPTA es un instrumento para profundizar las vinculaciones tecnológicas con instituciones públicas y privadas, a los efectos de llevar a cabo proyectos conjuntos.

De esta manera, se busca potenciar el uso de capacidades técnicas y de infraestructura instalada, lo que resulta en un mejor aprovechamiento de los recursos nacionales para resolver problemas tecnológicos del sector agropecuario.

El Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria contribuye de esta manera a la consolidación de un sistema integrado de investigación agropecuaria para el Uruguay.

A través del Fondo de Promoción de Tecnología Agropecuaria (FPTA), INIA ha financiado numerosos proyectos de investigación agropecuaria a distintas instituciones nacionales e internacionales. Muchos de estos proyectos han producido resultados que se integran a las recomendaciones tecnológicas que realiza la institución por sus medios habituales.

En esta serie de publicaciones, se han seleccionado los proyectos cuyos resultados se considera contribuyen al desarrollo del sector agropecuario nacional. Su relevancia, el potencial impacto de sus conclusiones y recomendaciones, y su aporte al conocimiento científico y tecnológico nacional e internacional, hacen necesaria la amplia difusión de estos resultados, objetivo al cual se pretende contribuir con esta publicación.

Índice general

Introducción	9
Estrategia de trabajo	11
Descripción de los sitios y condiciones climáticas	12
Efecto de la descompactación sub superficial del suelo sobre su resistencia mecánica a la penetración	14
Identificación de zonas con compactación inicial diferencial	14
Respuesta a la descompactación sub superficial del suelo en rendimiento de soja	18
Respuesta en rendimiento de trigo y cebada	21
Respuesta en rendimiento de maíz y sorgo	23
Respuesta en fenología, crecimiento, temperatura de hoja y nutrición de cultivos	23
Consideraciones finales	24
Bibliografía	25

Responsable técnico del proyecto:

Lic. Luciano Dabala

Equipo técnico de trabajo:

Oswaldo Ernst

Pilar Etchegoimberry

Mónica Cadenazzi

Ramiro Izaguirre

Estudiantes que realizaron su trabajo final de grado en el marco del proyecto:

Santiago Barolín, Federico Ernst, Rodrigo Ferreira,

Rocío Krall, Ricardo Mozzaquatro, Ignacio Prieto,

Miguel Raffo, Pablo Rivoir, Fernando Rostán

DESCOMPACTACIÓN SUB SUPERFICIAL DEL SUELO EN SISTEMAS DE AGRICULTURA CONTINUA SIN LABOREO

FPTA 337

Período de ejecución:

Abril 2014 - Setiembre 2017

Introducción

La agricultura continua sin laboreo puede generar condiciones físicas del suelo restrictivas, que limitan el ingreso de agua al suelo y la exploración radicular, generando limitantes para la absorción de agua y nutrientes por las plantas.

En Uruguay, los sistemas agrícolas sin laboreo se desarrollaron inicialmente sin esta limitante, ya que utilizaron la rotación de cultivos con pasturas y el tiempo de barbecho como variables de manejo para evitar y manejar problemas de compactación superficial asociados, en la mayoría de los casos, al pisoteo por pastoreo de las pasturas y verdeos. Si bien al momento de elaborar este proyecto existían experiencias con el uso de labranza sub superficial de suelo a nivel comercial que se valoraban como positivas, no se dispone de cuantificaciones de la condición inicial del suelo que permita diagnosticar la presencia o no de capas compactadas sub superficiales. Por tanto, no es posible discriminar las situaciones en las que es esperable respuesta de aquellas en las que no.

El uso de paraplow para aliviar restricciones físicas del suelo fue evaluado en Uruguay en la década de los 90, en especial, en maíz y girasol de primera como cabeza de rotación (Martino, 1997). Se cuantificaron respuestas de rendimiento de hasta 100%, asociadas a mejora en el control de malezas a la salida de praderas y en la implantación en los testigos sin descompactar.

La compactación sub superficial reduce el rendimiento de los cultivos por varias causas, dentro de las cuales se mencionan la absorción de agua y nutrientes por restricciones del crecimiento radicular, pero también por reducción de la infiltración y la aireación del suelo. La magnitud del efecto depende del tipo de suelo, siendo mayor al aumentar la proporción de arcillas, y bajo condiciones climáticas limitantes, en especial, el régimen hídrico (Al-Adawi and Reeder, 1996; Ishaq *et al.*, 2001; Voorhees *et al.*, 2000, Håkansson *et al.*, 1987, Palta, *et al.*, 2011). En años secos el efecto se explica mayoritariamente por el efecto negativo sobre el crecimiento radicular y cuando se producen excesos hídricos, por su efecto sobre la disponibilidad de nitrógeno (Ishaq *et al.*, 2001). La reducción del espacio poroso del suelo favorece las pérdidas por desnitrificación en condiciones húmedas, incrementando las necesidades de fertilización nitrogenada y modificando la eficiencia de uso del nitrógeno (Torbert y Wood, 1992; Díaz_Zorita *et al.*, 2002; Motavalli *et al.*, 2003). En suelos compactados se ha observado una menor concentración y toma de nutrientes como nitrógeno fósforo y potasio, lo cual puede inducir deficiencias nutricionales aun en suelos con buena disponibilidad de nutrientes (Ahmad *et al.*, 2009; Díaz-Zorita *et al.*, 2000,; Ishaq *et al.*, 2003).

La descompactación mecánica mejora la condición física del suelo, pero la respuesta en rendimiento de los cultivos es errática, dependiendo fundamentalmente de la oferta de agua (Nicoloso

et al., 2008, Botta *et al.*, 2004, Sadras *et al.*, 2005; Girardello *et al.*, 2014). Recientemente, Schneider *et al.*, (2017), resumieron resultados de la respuesta a la descompactación sub superficial del suelo sobre el rendimiento de los cultivos en 1478 experimentos en condiciones variables de clima, suelo y manejo. Concluyen que la respuesta positiva depende de la existencia de capas compactadas que restrinjan el acceso de las raíces al agua y nutrientes almacenados en capas más profundas, lo cual ocurrió en el 26% de los sitios. Fue máximo en condiciones de déficit hídrico y nutricional para los cultivos. En tales condiciones, la labranza profunda aportaría a la reducción del riesgo en ambientes con precipitaciones variables.

El efecto de la compactación del suelo sobre el crecimiento y rendimiento de los cultivos puede dividirse en (i) reducción de la captura de recursos, lo cual tendría dos componentes (a) captura de lluvia y (b) captura de radiación y (ii) eficiencia de uso del agua y nutrientes disponibles en el suelo más eficiencia de uso de la radiación. Sadras *et al.*, (2005), comparando el efecto sobre trigo de tratamientos apareados con y sin descompactación sub superficial, determinaron una reducción significativa en la densidad aparente y resistencia a la penetración del suelo, lo que se tradujo en diferencias significativas en la captura de radiación en la fase temprana del desarrollo (crecimiento inicial más lento). A esto se sumaron diferencias en la eficiencia de uso de la radiación fotosintética activa interceptada y en la eficiencia de uso del agua transpirada. Por tanto, la compactación afectó tanto la captura de luz, agua y nutrientes como la eficiencia de uso de los recursos capturados. El efecto sobre la captura de agua fue asociado a la modificación del contenido hídrico del suelo para el límite inferior de agua disponible, es decir que frente a un contenido similar de agua, su disponibilidad para las plantas fue menor en el suelo compactado. Los resultados deben relativizarse a condiciones de residencia a la penetración del suelo a capacidad de campo mayores a 2,5 MPa. En trabajos realizados en un suelo arenoso en el Costal Plain en USA, el laboreo en profundidad (uso de paratill o paraplow) Siri Prieto *et al.*, (2009) lograron levantar una restricción al crecimiento radicular medido a través de la resistencia a la penetración en todo el perfil del suelo (95% con valores por encima de 2,0 MPa en los primeros 50 cm). Este efecto se mantuvo solo para dos ciclos de cultivos siguientes (verano e

invierno). También Benjamin *et al.* (2003) atribuyen el efecto negativo de la compactación del suelo al cambio en la disponibilidad del agua retenida en el suelo. Para ello utilizaron el intervalo hídrico óptimo. Este índice afecta el agua disponible entre humedad a capacidad de campo y marchitez permanente, por la resistencia mecánica a la penetración del suelo (RP) y la porosidad macro, encontrando relación significativa positiva de este indicador con el rendimiento relativo de trigo. Álvarez *et al.*, (2009) en Argentina, compararon el efecto de descompactar el suelo con paratill en sitios de producción de maíz en las provincias de Santa Fe y Buenos Aires (Pampa Ondulada) con más de 10 años de agricultura continua en siembra directa, manejados con rotaciones trigo/soja de segunda-maíz-soja de primera o trigo/soja de segunda-maíz. En promedio la descompactación aumentó en un 5,6% el rendimiento de maíz ($p \leq 0,05$), relacionándose con reducción del 37 y 24% en la RP entre 0-25 cm y 0-40 cm, respectivamente e incremento en la velocidad de infiltración de agua. No se cuantificó efecto residual significativo sobre el cultivo siguiente. En la Pampa húmeda Argentina, donde al igual que en Uruguay, el laboreo fue sustituido por agricultura continua sin laboreo, la condición física del suelo cuantificada por su RP y estabilidad de agregados es mejor que en situaciones de agricultura continua con laboreo, pero muestra niveles menores que después de pastura. Sin embargo, Micucci y Taboada (2006) concluyen que el contenido de arcilla (mayor a 35%) del horizonte sub superficial condiciona la cantidad de raíces de soja que logran explorarlo en mayor medida que el laboreo.

La compactación generada por manejo puede ser resuelta mecánicamente o utilizando cultivos cuyas raíces tengan la capacidad de explorar horizontes compactados y generar bioporos para los cultivos siguientes (Larson *et al.*, 1994). Calonego y Ciro (2010) en Brasil muestran que la descompactación mecánica tiene un efecto positivo de corto plazo, que puede ser sustituido por la incorporación de rotación de cultivos y cultivos de cobertura. Concluyen que la gradual mejora de la condición física de un suelo producido por la rotación de cultivos puede resolver un problema de compactación en 3-4 años de manera permanente, mientras que el uso de descompactación mecánica tiene un efecto de corto plazo. En este sentido, Ferreras *et al.*, (2000) trabajando en un suelo degradado por el uso agrícola continuo durante 25 años con laboreo, concluyen que es necesario

mejorar esta condición antes de iniciar un sistema agrícola sin laboreo y que para ello, la mejor alternativa sería incluir períodos de pasturas con gramíneas.

Otra de las variables que se asocian a la aparición de compactación es el tráfico y peso de la maquinaria agrícola. El tránsito de la maquinaria agrícola con equipos de tamaño y peso creciente y las operaciones, fundamentalmente de cosecha, con humedad de la superficie del suelo más elevada que la óptima para el tránsito de ruedas, se encuentran entre las principales causas de la formación de una estructura masiva en el horizonte superficial de los suelos agrícolas (Quiroga *et al.*, 1999; Botta *et al.* 2006). Si bien el tráfico de maquinaria en sistemas de siembra directa es menor que con laboreo convencional, luego de varios años de agricultura continua sin laboreo se puede registrar una tendencia negativa del rendimiento de los cultivos. Las causas son múltiples, pero una de ellas puede ser el gradual aumento de la compactación del suelo producido por el tráfico de maquinaria (Botta *et al.*, 2010). En este sentido, Vázquez *et al.*, (1989) cuantificaron incrementos en el rendimiento de soja de hasta 48% por subsolado de la entre fila afectada por el tráfico. Esto, sumado a la posibilidad de identificar las zonas afectadas por la compactación dentro de una misma chacra plantea la posibilidad de corregir el problema de manera dirigida y no en toda la superficie.

A los efectos de este proyecto se identifican tres componentes del problema: (i) no existe una cuantificación objetiva de la existencia del problema y en caso de existir, de la superficie afectada, (ii) no se dispone de indicadores para realizar un relevamiento a nivel de chacras para detectarlo y cuantificar la superficie afectada, y (iii) no se dispone de una cuantificación del efecto residual de la descompactación ni el acumulado en la secuencia de cultivos.

Se plantea como objetivos específicos cuantificar la respuesta vegetal a la descompactación, su variabilidad espacial y su residualidad, en sistemas agrícolas sin labranza seleccionados a partir de un diagnóstico subjetivo sobre la existencia o no de un problema de compactación del suelo como limitante del rendimiento de los cultivos. Se busca de esta manera trabajar sobre un gradiente de situaciones en las que a priori se espera

una respuesta diferencial a la descompactación mecánica sub superficial del suelo. Como indicador para diagnosticar la presencia o no del problema se utiliza la resistencia mecánica a la penetración del suelo (RP) a un contenido de agua próximo a capacidad de campo, de manera de reducir la interferencia que tiene la humedad del suelo sobre los valores de RP. La elección de este indicador se justifica por la facilidad con la que puede relevarse a nivel de chacra.

Estrategia de trabajo

Se seleccionaron chacras en agricultura continua sin labranza, de manera de disponer de situaciones con condiciones predisponentes para la manifestación de problemas de compactación del suelo y un sitio que estuvo en rotación con pasturas. En cada sitio se evaluó un tratamiento sin laboreo (SD) contra descompactado sub superficial utilizando paraplow o paratill (D), en fajas apareadas de aproximadamente 400 m de largo por 30m de ancho con 3 repeticiones. En cada año se instaló un experimento continuo, manteniendo intercaladas las fajas SD. de ésta manera se pretendió incorporar la posible variabilidad espacial y temporal de las propiedades edáficas, la respuesta vegetal a la descompactación y la cuantificación del efecto residual.

El proyecto se realizó en chacras de productores agrícolas pertenecientes a la Asociación Uruguay pro Siembra Directa (AUSID), evaluando los resultados de los tratamientos en los cultivos integrantes de la secuencia que cada uno implementó (Cuadro 1). Por tanto, la única intervención realizada sobre el manejo del cultivo fue el tratamiento D, dejando constante el resto de las variables de manejo y sujetas a lo realizado en el área comercial. En el momento de formular el proyecto, los cultivos integrantes de la secuencia eran mayoritariamente soja, trigo y maíz. Durante la ejecución del mismo, las relaciones de precio fueron desfavorables para maíz y trigo. Por tanto, los resultados presentados son mayoritariamente de respuesta de soja, existiendo una limitada cantidad de resultados para trigo y maíz.

Todas las determinaciones se realizaron en un radio de 10 m entorno al centro de una grilla de muestreo georreferenciada de aproximadamente

30*30 m, generándose entre 14 y 16 sitios de muestreo por faja según el largo efectivo de cada experimento. En todos los sitios se cuantificó:

- i) resistencia mecánica a la penetración del suelo a intervalos de 2 cm y hasta 40 cm de profundidad previo a la siembra de cada cultivo o dentro de los 30 días pos-siembra. La determinación se realizó luego de un período de recarga de agua, de manera de asegurar humedad del suelo entorno a capacidad de campo.
- ii) Conductividad eléctrica aparente a 15 y 30 cm de profundidad
- iii) Implantación, estado fenológico a fecha fija y altura de planta a inicio del estado reproductivo.
- iv) Componentes del rendimiento
- v) Estado nutricional en la hoja de referencia de cada cultivo a inicio del estado reproductivo
- vi) Rendimiento en grano

La cosecha, cuando disponible, se realizó utilizando cosechadoras equipadas con monitores de rendimiento y GPS, estimando el rendimiento de cada celda como el promedio de los sitios más cercanos al centro de la grilla.

Descripción de los sitios y condiciones climáticas

El proyecto se ejecutó entre el otoño del 2014, en que se instalaron los tratamientos de los primeros sitios y mayo del 2017, cuando se cosecharon los cultivos de verano correspondientes a la zafra 2016_17. En el cuadro 1 se describen las características de los sitios y la secuencia de cultivos.

En el período de estudio la cantidad y distribución de las precipitaciones generó estaciones de crecimiento caracterizadas como húmedas para cultivos de invierno. La oferta hídrica durante la estación de crecimiento 2014_2015 fue muy favorable durante el período vegetativo de soja pero con un déficit hídrico progresivo a partir del inicio de la fase reproductiva. En tanto, las estaciones 2015_2016 y 2016_17 tuvieron una menor oferta hídrica durante la fase vegetativa de los cultivos, pero favorable a muy favorables a partir del inicio del período crítico de determinación del número de granos, tanto en soja como maíz (Figura 1).

Cuadro 1: Grupo de suelo, años de agricultura continua sin labranza desde la última fase de pasturas y secuencia de cultivos para el período otoño 2014 a otoño 2017. En negrita y subrayado se indica el cultivo inmediato siguiente a la descompactación sub superficial del suelo. En los cultivos siguientes se evalúa el efecto residual.

Sitio	Grupo de suelo	Años con agricultura continua	2014_15	2015_16	2016_17
1_2014	10.1	>15	soja	soja	trigo/soja
1_2015			soja	soja	trigo/soja
1_2016			soja	soja	trigo/soja
2_2014	11.4	>15	soja	soja	cebada/maiz
2_2015			soja	soja	cebada/maiz
2_2016			soja	soja	cebada/maiz
3_2014	11.6	0	soja	soja/avena	maiz
3_2015			soja	soja	avena/maiz
3_2016			soja	soja	avena/ maiz
4_2014 *	11.4	3	soja		
5_2014	11.1		soja	trigo/soja	avena/sorgo
5_2015			soja	trigo/soja	avena/sorgo
5_2016			soja	trigo/soja	avena/ sorgo
6_2015	11.5	>15		soja	cebada/soja
6_2016				soja	cebada/soja

*=Experimento discontinuado el primer año por cambio de usuario de la tierra.

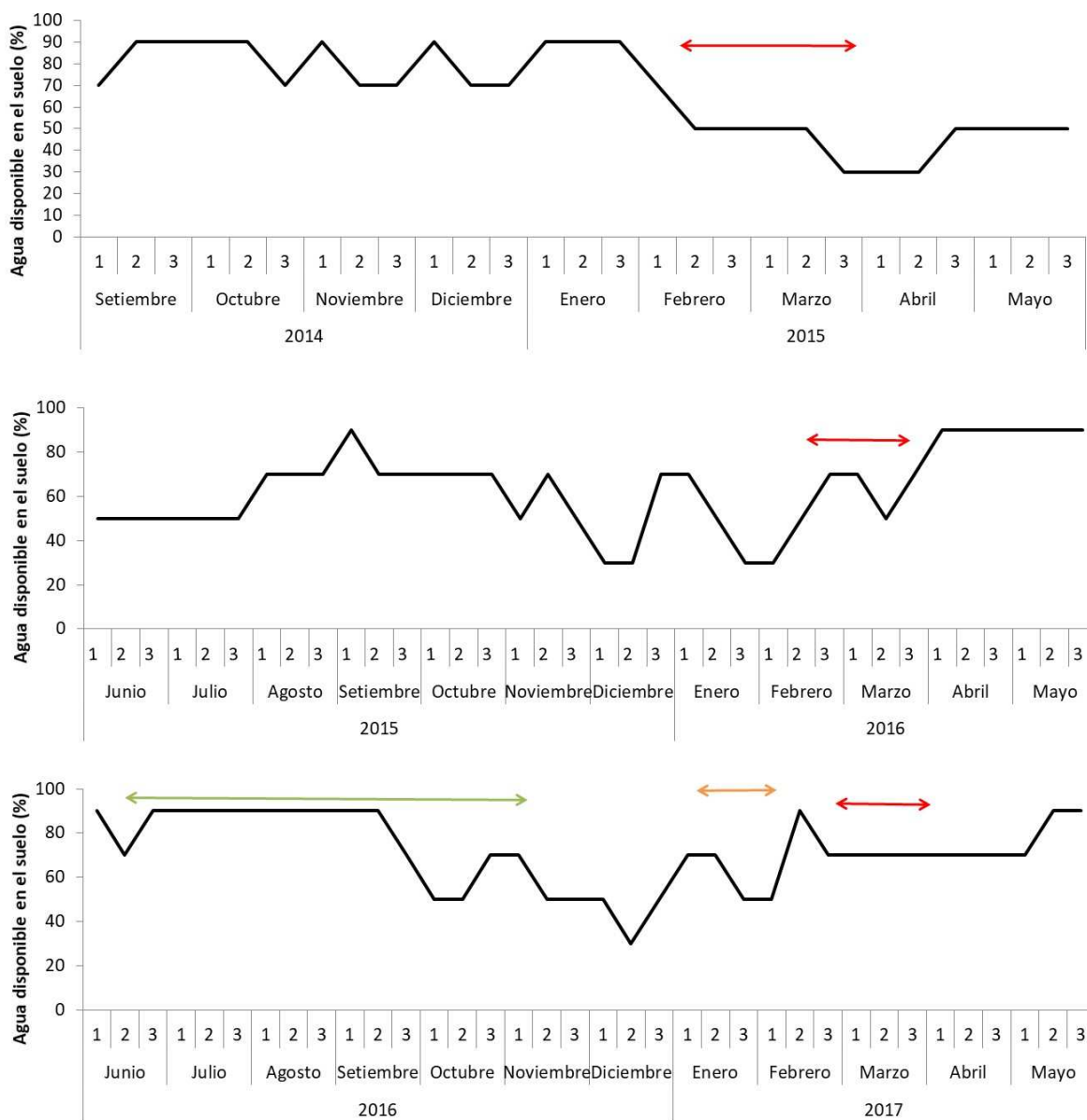


Figura 1. Agua disponible (%) estimada en el suelo durante el período otoño 2014 a otoño 2016. Elaborado a partir de INIA_GRASS. La línea representa el valor medio del rango estimado por década.

Flecha verde doble: ciclo de cultivos de invierno; Flecha doble naranja: ubicación temporal del período crítico de determinación del número de granos de los cultivos de maíz; Flecha doble roja: ubicación temporal del período crítico de determinación del número de granos de los cultivos de soja.

Efecto de la descompactación sub superficial del suelo sobre su resistencia mecánica a la penetración

En todos los casos el pasaje del paraplow produjo un efecto reductor significativo ($P \leq 0,05$) sobre RP del suelo en el estrato entre 8 y 30 cm de profundidad. En el estrato más superficial y entre 30 y 40 cm no hubo diferencia entre tratamientos.

El efecto se perdió gradualmente, pero en algunos sitios se mantuvo un efecto residual significativo durante dos años. En la Figura 2 se muestran los dos tipos de respuesta cuantificadas, tomando como ejemplo dos de los sitios evaluados.

El perfil de RP del suelo de los tratamientos SD de cada año fue similar, lo que permite comparar el efecto de la descompactación realizada en años diferentes (2014, 2015 y 2016). En la situación "A" se cuantificó lo que se denomina respuesta directa, correspondiente al efecto producido por la descompactación realizada para el cultivo previo (medido en 2017 contra descompactado en 2016), efecto residual de descompactar el año previo (medido en 2017 contra descompactado en 2015) y efecto residual de la descompactación realizada dos años y medio antes (medido en 2017

contra descompactado en 2014). En tanto, en la situación "B", sólo se cuantificó efecto directo. Tan solo 18 meses después de realizada la labor de descompactación mecánica, el suelo ya volvió a un nivel de resistencia a la penetración similar a siembra directa sin descompactar.

Se destaca que en promedio de cada sitio, la RP no superó el valor crítico de referencia para crecimiento radicular, establecido en $2,5 \text{ MPa cm}^{-2}$. No obstante, se registraron valores en el rango entre $1,5$ y $1,8 \text{ MPa cm}^{-2}$, que se utiliza como referencia a partir del cual comienzan a manifestarse problemas para el crecimiento de raíces, dependiendo su magnitud, del cultivo, textura del suelo y disponibilidad hídrica.

Identificación de zonas con compactación inicial diferencial

Para identificar zonas dentro de sitios con niveles de resistencia mecánica a la penetración del suelo inicial diferencial se utilizó la RP de los tratamientos sin descompactar. En 4 sitios existió correlación espacial media a alta, lo que permitió agrupar espacialmente los sitios en ALTA, MEDIA y BAJA compactación inicial (Figura 3) y analizar el efecto de la descompactación dentro de cada zona (Figura 4).

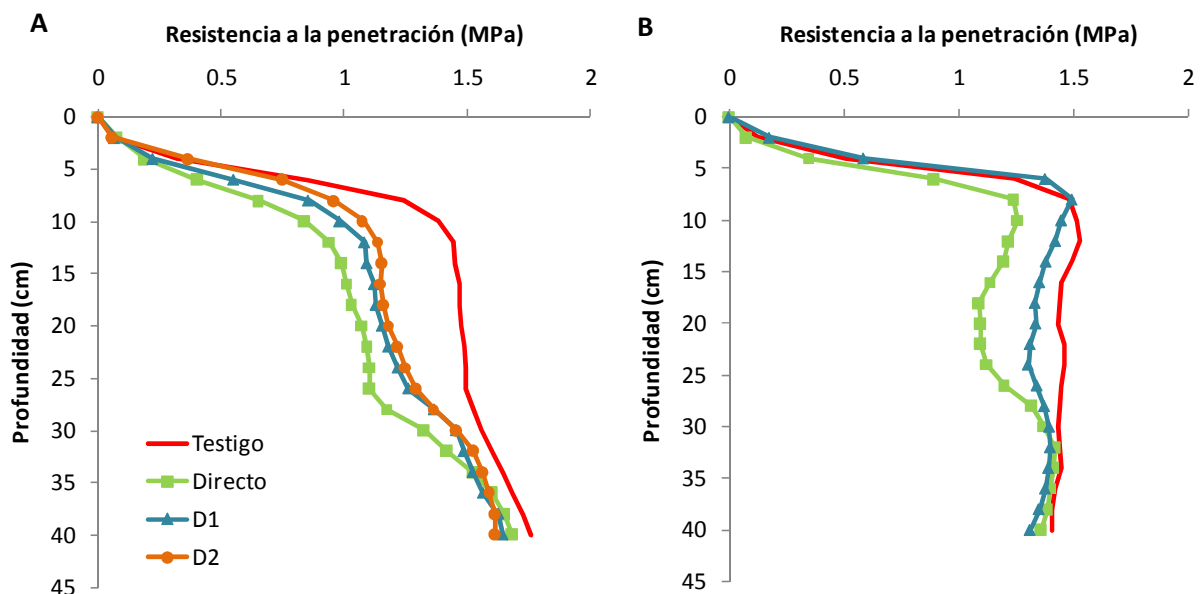


Figura 2. Perfil de resistencia mecánica a la penetración del suelo hasta 40 cm de profundidad para siembra directa (SD) y descompactado sub superficialmente (D2 = descompactado 30 meses antes; D1= descompactado 18 meses antes; Directo = descompactado 6 meses antes). A: sitio con efecto residual; B: sitio sin efecto residual.

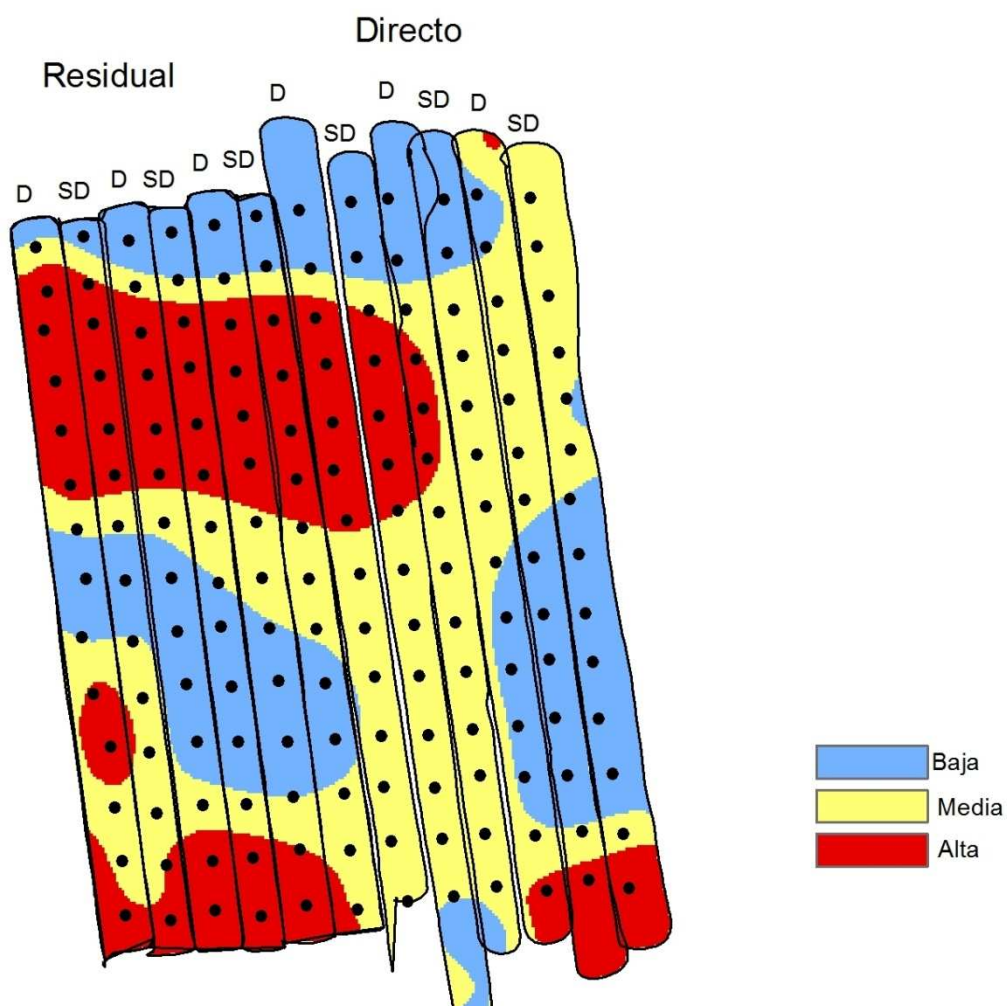


Figura 3. Ubicación espacial de zonas con diferentes perfiles de resistencia mecánica a la penetración del suelo (MPa cm^2) identificadas a partir de la resistencia a la penetración de los tratamientos SD (Sitio 2).

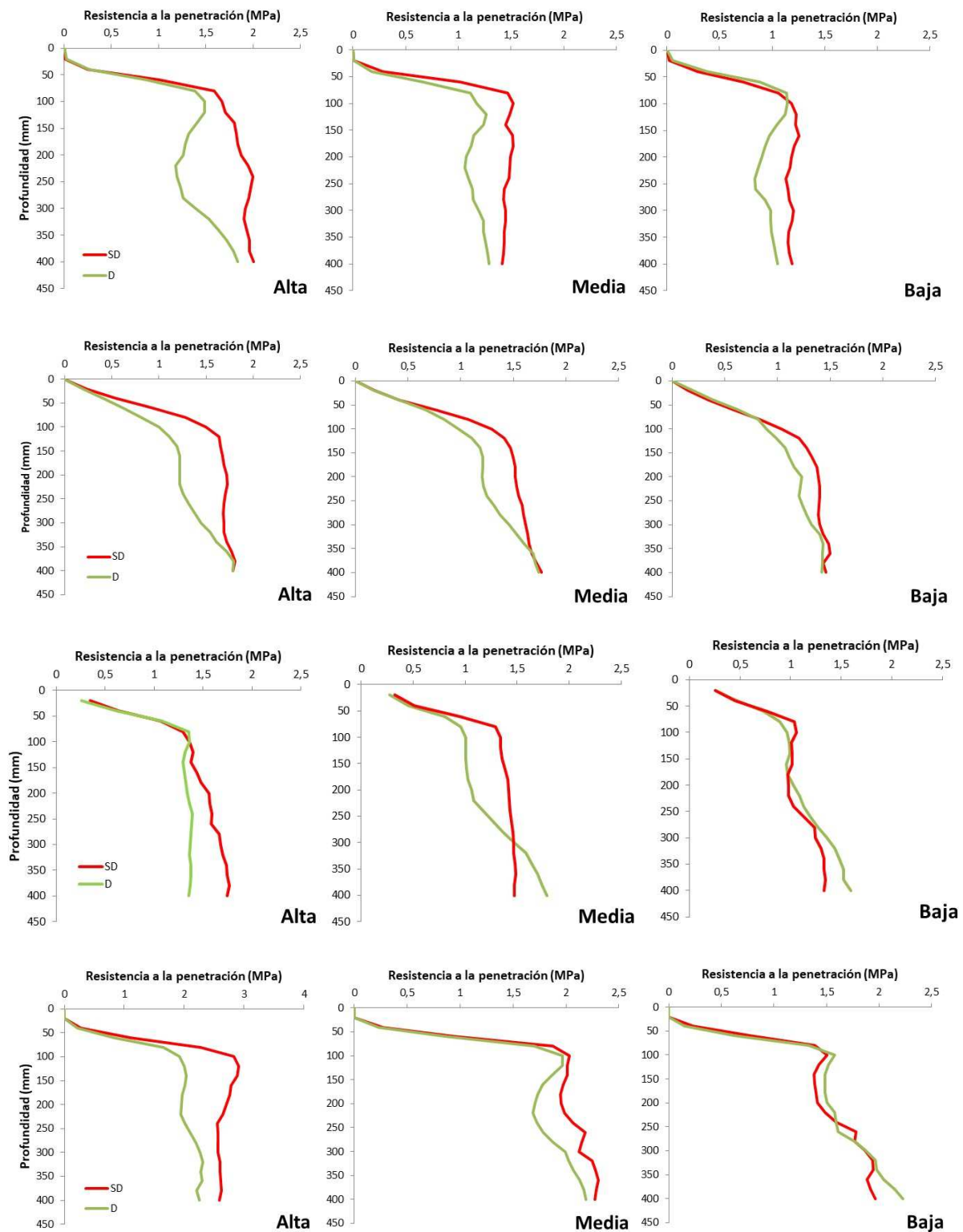


Figura 4. Perfil de resistencia mecánica a la penetración del suelo hasta 40 cm de profundidad para siembra directa (SD) y descompactado sub superficialmente (D) en zonas dentro de chacras con compactación inicial diferente identificadas a partir de la resistencia a la penetración de los tratamientos SD.

Dentro de una chacra existieron zonas calificadas como de BAJA compactación inicial por su R_p , en las cuales la D no generó cambios significativos ($p \leq 0,5$). En las zonas calificadas como MEDIA, descompactar generó una reducción significativa de R_p , dejándola en valores similares a la zona BAJA.

El promedio de R_p en el estrato entre 8 y 20 cm del suelo en las chacras en las que fue

posible identificar una zona caracterizada como de ALTA compactación fue de $1,9 \text{ MPa cm}^{-2}$, diferenciándose significativamente del promedio de las zonas caracterizadas como MEDIA y BAJA ($1,7$ y $1,5 \text{ MPa cm}^{-2}$ respectivamente) (Figura 5 A). La dispersión de los valores de resistencia registrados dentro de cada zona indica que la zona de ALTA incluye valores a partir de $1,7 \text{ MPa cm}^{-2}$ (Figura 5 B).

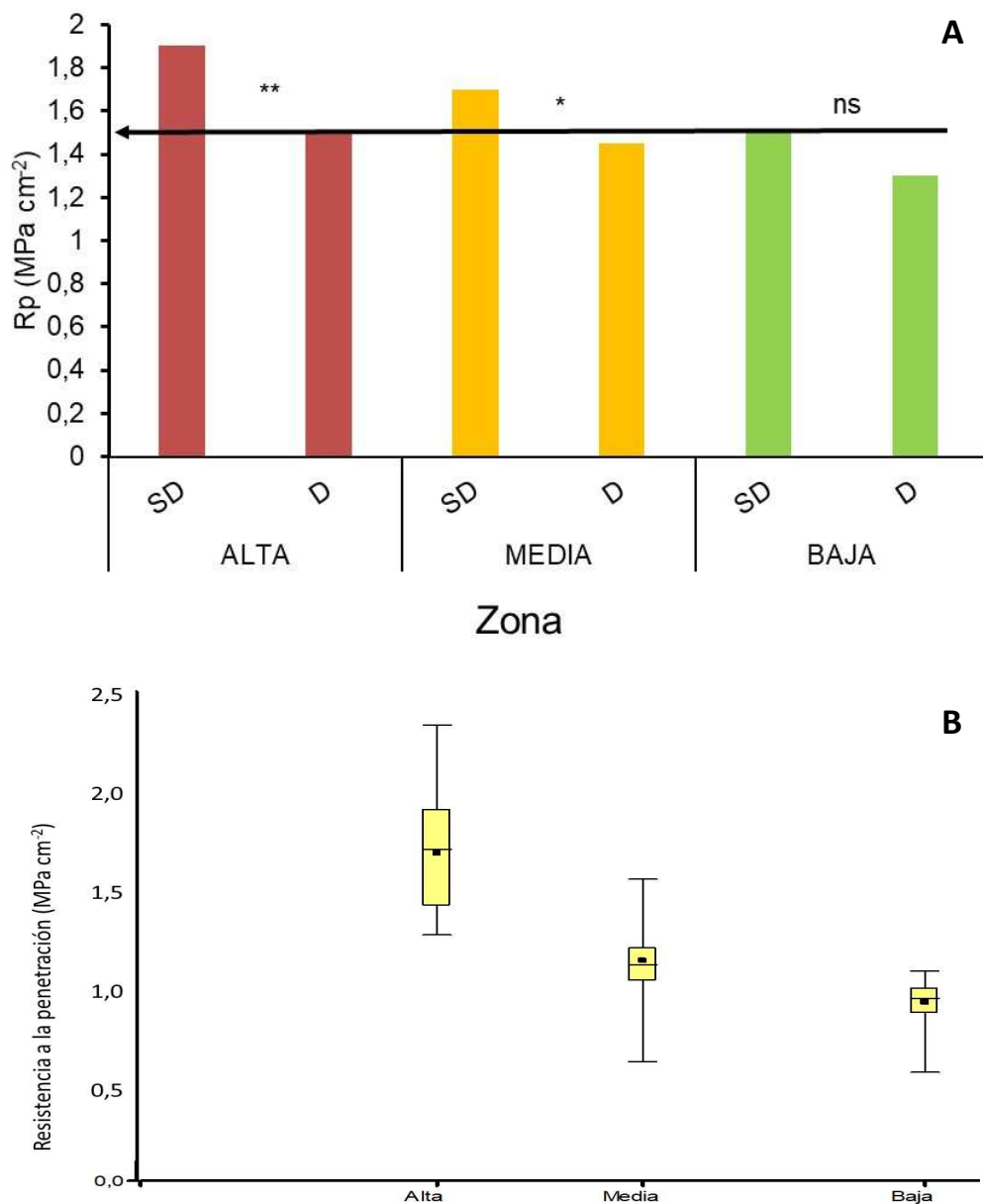


Figura 5. Resistencia mecánica a la penetración del suelo (MPa cm^{-2}) promedio en el estrato entre 8 a 20 cm de profundidad en siembra directa (SD) y después de una labor de descompactación sub superficial del suelo (D) realizada 6 meses previos a la siembra de soja (A) y dispersión de registros de resistencia a la penetración dentro de zonas para los tratamientos descompactados (B). ** $p < 0,01$; * $p < 0,05$; ns: no significativo

Por tanto, si bien en el promedio de la chacra (sitio) la RP fue menor a 1,7 MPa, hubo registros con RP promedio superiores, agrupados espacialmente en zonas de la chacra. En tales zonas, la descompactación mecánica redujo la RP, ubicándola dentro del rango cuantificado para SD en las zonas de BAJA RP.

Respuesta a la descompactación sub superficial del suelo en rendimiento de soja

En la Figura 6 se resume la respuesta promedio cuantificada en rendimiento de soja en los tres años evaluados.

En promedio, no existió efecto significativo directo de la descompactación del suelo sobre el rendimiento de soja, pero hubo dos interacciones significativas ($p \leq 0,05$): i) respuesta diferencial a la descompactación por sitio; ii) respuesta diferencial a la descompactación por zona. La primera indica que la repuesta dependió del ambiente de producción, definido por la combinación sitio_año (Figura 1). La segunda, que la respuesta varió en función de la condición inicial de compactación del suelo, definida en función de la RP del suelo en los tratamientos SD en aquellas situaciones en que fue posible cuantificar correlación espacial para esta variable (Figura 7).

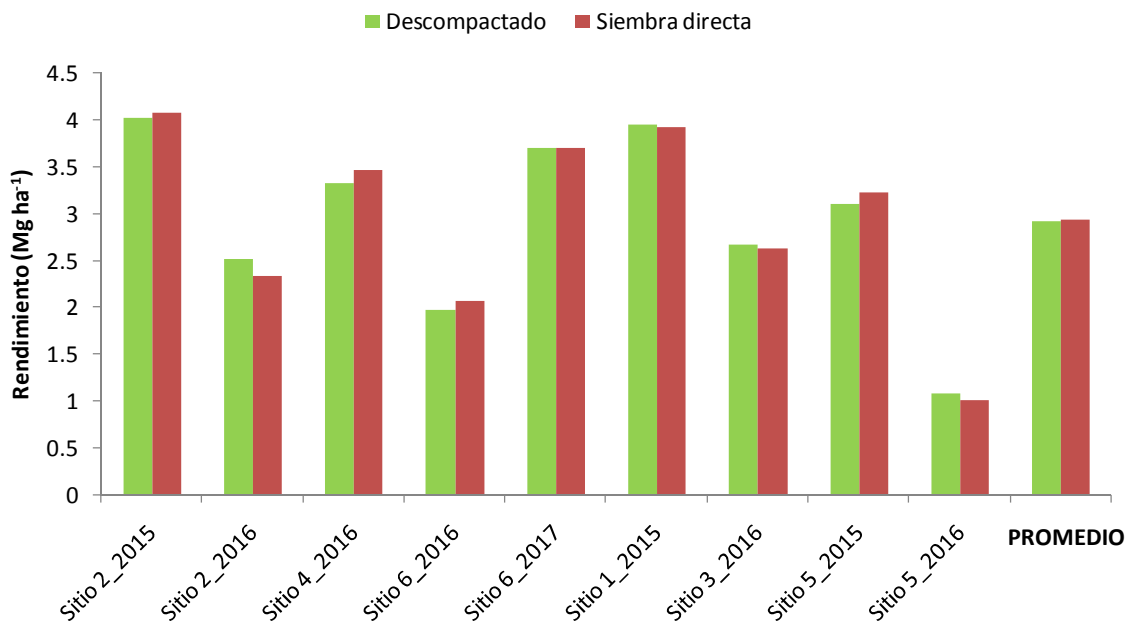


Figura 6. Respuesta promedio en rendimiento de grano de soja a la descompactación sub superficial. La referencia de año dentro de sitio corresponde a la aplicación del tratamiento de descompactación sub superficial.

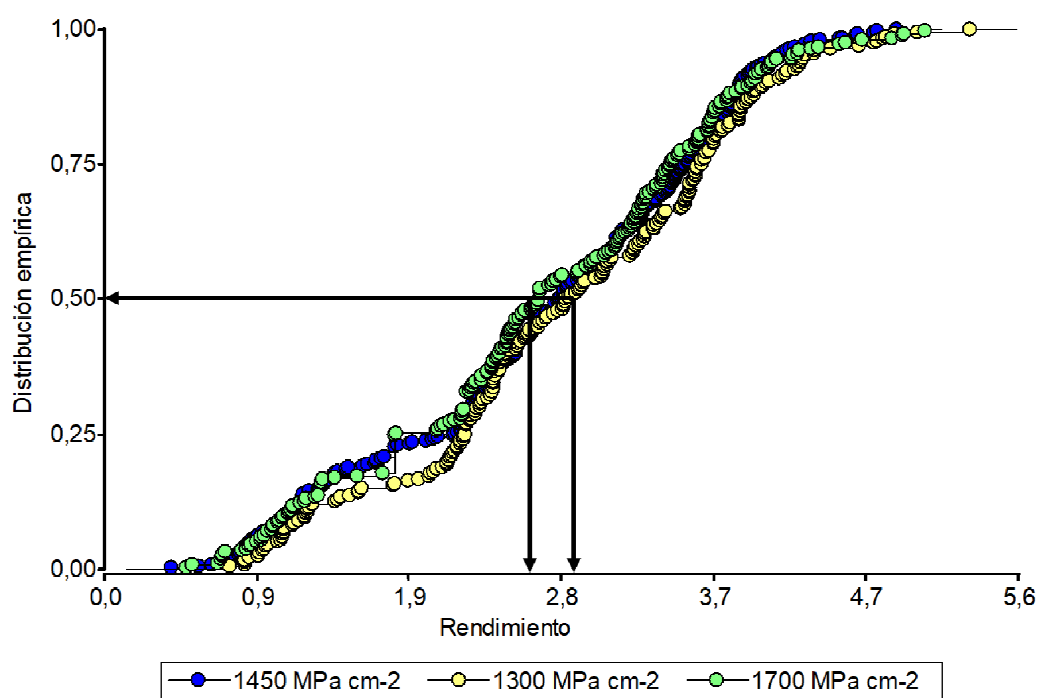


Figura 7. Distribución empírica del rendimiento de soja (Mg ha^{-1}) en zonas definidas por el promedio de la resistencia mecánica a la penetración (MPa cm^{-2}) del suelo en el estrato entre 8 y 20 cm.

En promedio, no existió efecto significativo directo de la descompactación del suelo sobre el rendimiento de soja, pero la repuesta dependió del ambiente de producción, definido este, por la combinación sitio_año_zona. Las zonas identificadas por RP generaron una diferencia media de rendimiento de $0,16 \text{ Mg ha}^{-1}$, siendo el efecto creciente en sitios con rendimiento inferior al promedio ($2,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) y desapareciendo en sitios de alto rendimiento (Figura 7).

Para analizar la interdependencia de la RP, el efecto generado por las condiciones ambientales determinantes del rendimiento y la diferencia entre el rendimiento logrado y el alcanzable en cada combinación sitio_zona, se realizó un análisis estadístico multivariado de componentes principales. El efecto del ambiente, de aquí en más índice de ambiente (IA), se cuantificó como el percentil 90 de rendimiento. Siguiendo la definición de van Ittersum *et al.*, (2013), el IA representa el rendimiento alcanzable de soja en cada sitio. La diferencia entre el rendimiento medido en cada punto de muestreo georreferenciado y el IA representa la brecha de rendimiento (Brecha) determinada por variables y atributos del suelo que limitan el rendimiento, más el efecto de los posibles

factores reductores del rendimiento (malezas, enfermedades, plagas) que pudieron afectarlo. El análisis permite reducir el número de variables a considerar generando un nuevo conjunto de variables no correlacionadas denominadas componentes principales (CP). Se retuvieron los CP necesarios para explicar al menos 70% de la varianza total, cuyo *eigenvalue* $>1,0$ y su contribución al $r^2_{\text{parcial}} > 5\%$ (Wander y Bollero, 1999). Las variables fueron estandarizadas (media = 0 y desvío estándar = 1), previo al análisis, de manera de transformar los datos originales a datos con el mismo orden de magnitud.

Los resultados muestran la posibilidad de identificar situaciones con respuesta a la descompactación utilizando la RP como indicador. El valor crítico de referencia estaría en el rango de 1,8 a 2,0 MPa cm^2 determinado con el suelo cercano a capacidad de campo. El efecto promedio en una chacra dada dependerá de la proporción de la misma que tiene el problema.

El 89% de la variación se explicó con dos CP que combinan IA, RP y Brecha. El CP1 (r^2 parcial 61%) separó sitios por su IA y el CP2 (r^2 parcial 28%) por la RP hasta los 20 cm de profundidad y

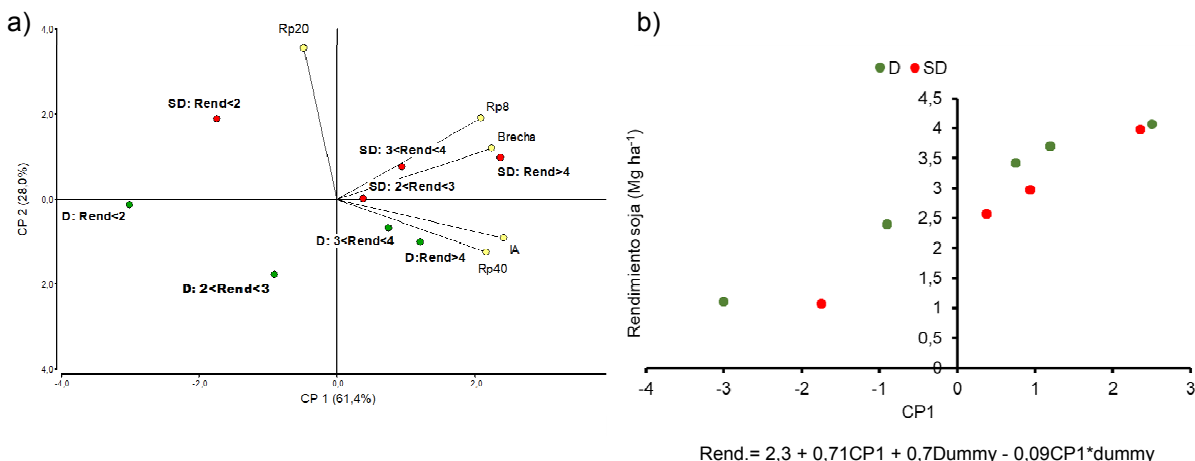


Figura 8. Efecto de la descompactación sub superficial del suelo sobre el primer (CP1) y segundo componente principal (CP2) para el conjunto de datos (a). Respuesta en rendimiento de soja a la descompactación en función del CP1 (b). Los símbolos representan el valor medio del componente (a) y el rendimiento de soja (b) para siembra directa (SD, rojo) y descompactado sub superficial (D, verde). El modelo ajustado para rendimiento incluye los tratamientos SD y D como un variable “dummy” donde SD=0 y D=1.

la Brecha. La combinación de los dos CPs generó cuatro cuadrantes. A la izquierda (Figura 8 a), los sitios con $IA < 2 \text{ Mg ha}^{-1}$ y a la derecha los de $IA \geq 2 \text{ Mg ha}^{-1}$, independientemente de si los puntos provinieron de tratamientos SD o D. En la mitad superior los de mayor RP del suelo hasta los 20 cm y Brecha, y en la inferior los de mayor IA y RP entre 20 y 40 cm. En este caso, el promedio de puntos SD se ubicaron el cuadrante superior y los de D en el inferior. Los tratamientos D generaron una migración desde la mitad superior a la inferior, indicando que D redujo la RP hasta 20 cm y la Brecha, pero que no logró modificar el impacto del IA, lo que supone que un sitio ubicado en la mitad izquierda pase a la mitad derecha. La Figura 8b muestra el efecto de la descompactación mecánica sub superficial sobre el rendimiento de soja y su dependencia del ambiente. El modelo utilizado para cuantificar la relación incluye el

CP1 como estimador del efecto del ambiente y los tratamientos como un variable “dummy” con valor cero para SD y 1 para D.

El resultado sugiere que el impacto de D se incrementó en ambientes con IA más bajo y cuya alta RP bajo SD fue reducida por la descompactación sub superficial, reduciendo la Brecha.

En la Figura 9 se resume el efecto promedio residual de la descompactación sobre el rendimiento de soja.

No hubo efecto residual sobre el rendimiento medio de soja (Figura 8 izquierda). No obstante, en uno de los sitios (Sitio 2_2016) se cuantificó una respuesta residual promedio de 260 kg ha^{-1} (Figura 8 derecha), pero de manera independiente de la RP de las zonas identificadas por ésta propiedad del suelo.

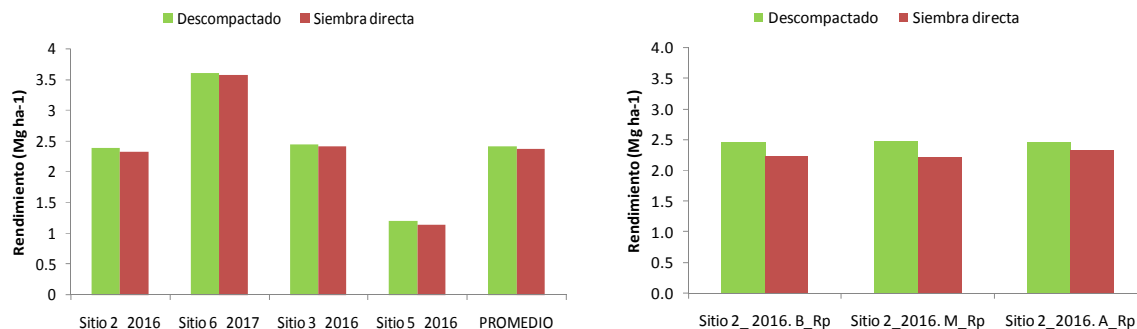


Figura 9. Efecto residual de la descompactación sub superficial promedio sobre el rendimiento de soja (izquierda) y para las zonas con resistencia a la penetración diferencial.

Respuesta en rendimiento de trigo y cebada.

No hubo respuesta significativa a la descompactación en rendimiento de trigo en ninguno de los sitios en que se sembró el cultivo, pero sí en cebada (Figura 10 y 11).

La respuesta diferencial está confundida por el año de siembra (trigo en 2015 y 2016 contra cebada 2017) y el sitio, ya que en el sitio 2 se cuantificó respuesta a la descompactación en todos los cultivos evaluados. La mayor respuesta a D en cebada que en trigo, además, ocurrió en una estación de crecimiento con excesos hídricos, por lo que es el comportamiento esperable para este cultivo bajo estas condiciones.

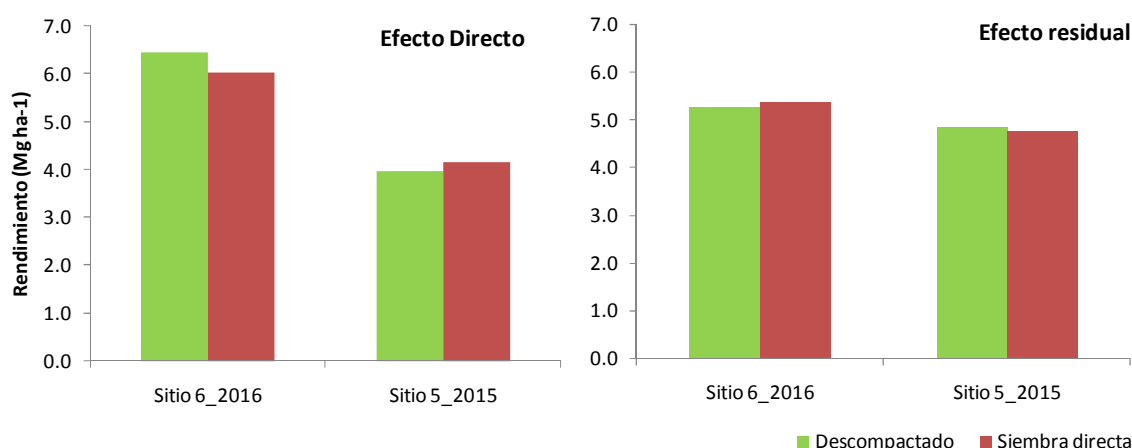


Figura 10. Respuesta de trigo sembrado en el invierno del 2016 (Sitio 6_2016) e invierno 2015 (Sitio 5_2015) a la descompactación sub superficial del suelo realizada el año en que se sembró el cultivo (izquierda, efecto directo) o el año previo (derecha, efecto residual de un año).

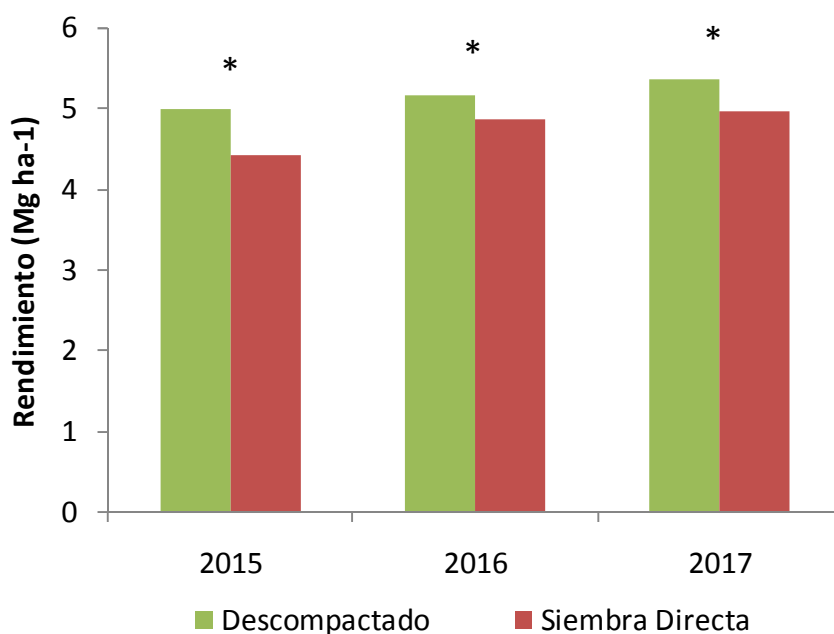


Figura 11. Respuesta de cebada sembrada en el invierno 2016 según año de la descompactación sub superficial del suelo (Sitio 2). * = P ≤ 0,05.

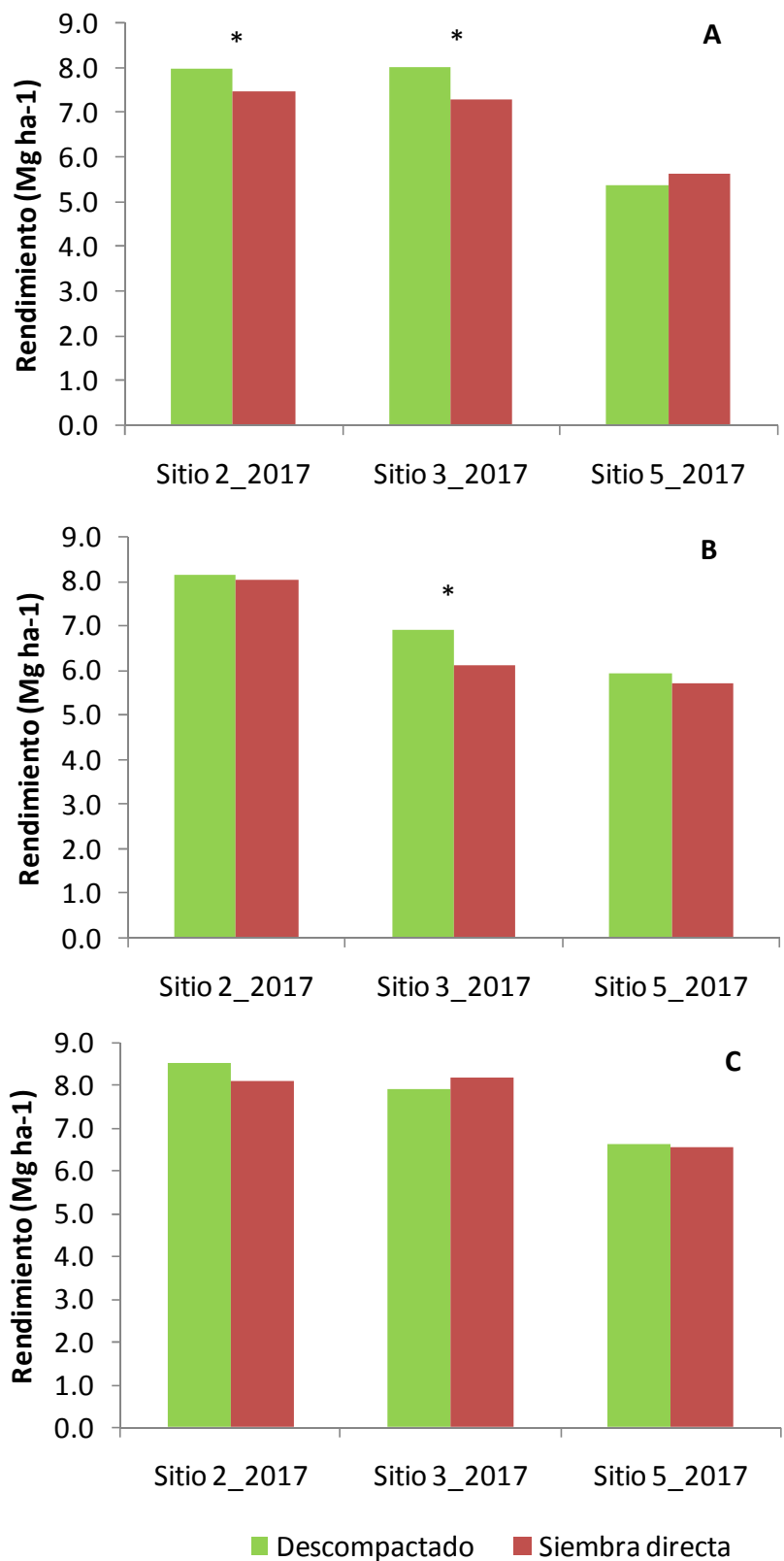


Figura 12. Respuesta en grano de maíz (Sitio 2_2017 y Sitio 3_2017) y sorgo (Sitio 5_2017) a la descompactación sub superficial realizada en el otoño 2016 (A), en otoño de 2015 (B) o en otoño 2014 (C).

Respuesta en rendimiento de maíz y sorgo.

Los cultivos de sorgo y maíz fueron evaluados solo en el verano 2016/17, con características hídricas muy favorables. No obstante en maíz hubo respuesta directa significativa a la descompactación (Figura 12 A) de entre 500 y 700 kg ha⁻¹, mientras que en sorgo la respuesta fue no significativa. Sólo en el sitio 3 existió respuesta residual de un año (Figura 12 B) y en ninguno de los casos existió respuesta residual de más de un año (Figura 12 C).

Respuesta en fenología, crecimiento, temperatura de hoja y nutrición de cultivos

En todos los sitios se cuantificó respuesta significativa de los cultivos en altura de planta, temperatura de hoja y estado nutricional del cultivo, sin cambios significativos en la población obtenida ni en el desarrollo fenológico. En la Figura 13 se presenta el efecto en los sitios con respuesta a la descompactación del suelo.

Los resultados sobre la nutrición del cultivo y la temperatura del follaje sugieren que la descompactación logró un mejor suministro de nutrientes y agua para el cultivo. La menor altura no fue resultado de cambio en fenología ni número de nudos del tallo, por lo que lo que se redujo fue el largo de entre nudos, respuesta que es asociada frecuentemente al incremento de la RP del suelo, aún estando ésta por debajo del rango de respuesta en rendimiento.

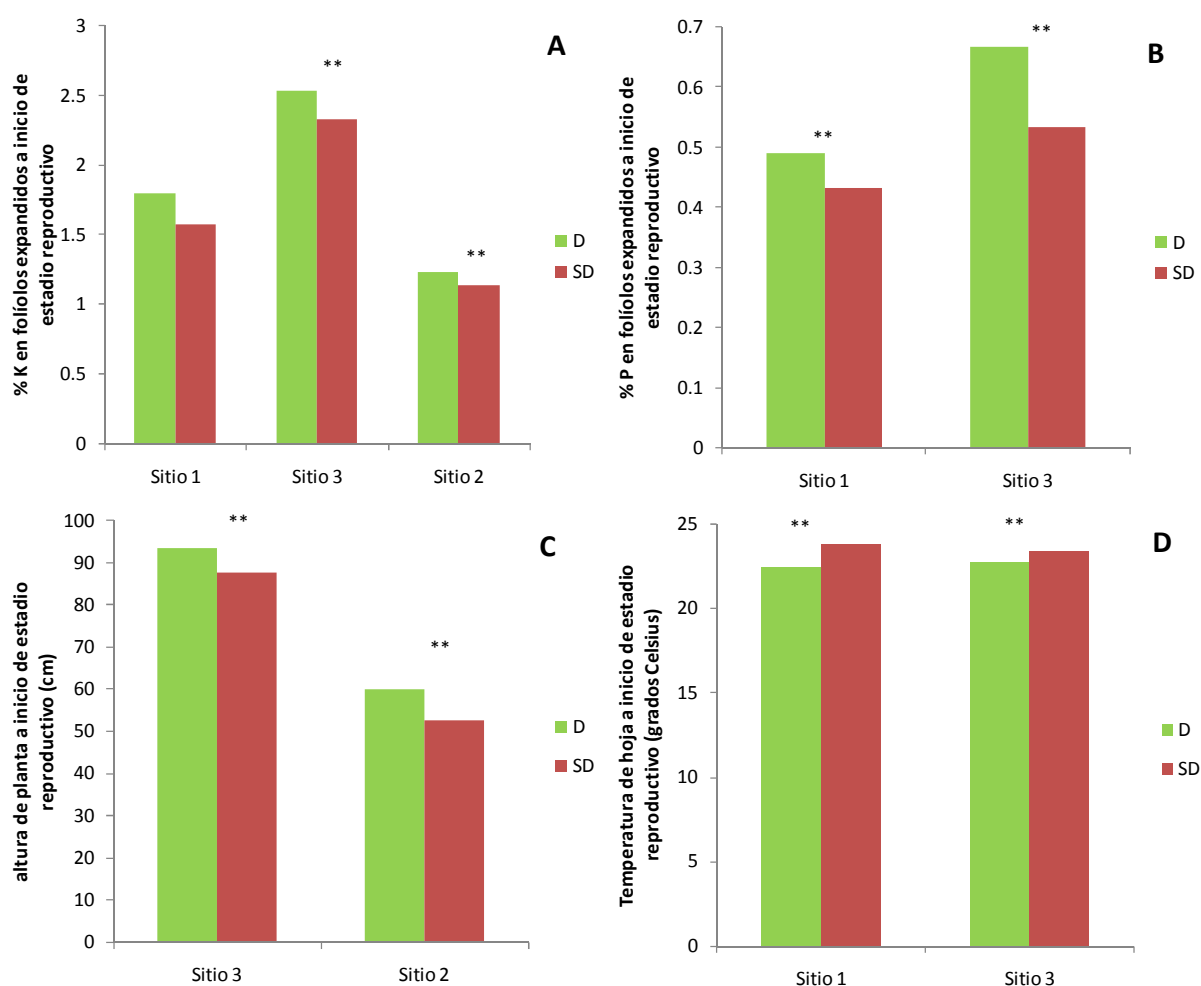


Figura 14. Respuesta de soja en concentración de potasio (A) y fósforo (B) en folíolos expandidos, altura de planta (C) y temperatura del follaje (D) a inicios de estadio reproductivo. D=descompactado; SD= siembra directa; **= P<0,05.

Consideraciones finales

El proyecto fue planteado de manera de generar un gradiente de resistencia a la penetración del suelo al último año de ejecución. En tal condición fue posible evaluar el efecto directo y residual de la descompactación sub superficial sobre la resistencia a la penetración del suelo hasta los 40 cm de profundidad.

La resistencia mecánica del suelo resultó útil para delinear zonas con compactación diferencial dentro de chacras. Para ello es necesaria una alta densidad de muestreo, de manera de lograr la correlación espacial requerida para identificar zonas.

Hay evidencias de que la probabilidad de encontrar respuesta a la descompactación mecánica sub superficial aumenta cuando la resistencia mecánica a la penetración del suelo es superior a $1,8 \text{ MPa cm}^{-2}$ en una capa sub superficial del suelo. No obstante, la respuesta en rendimiento ocurrió sólo cuando se combinó con condiciones ambientales y de manejo determinantes de bajo rendimiento. El impacto de esta práctica dependerá de identificar estas zonas, ya que la respuesta media en rendimiento de los cultivos depende de la proporción de la chacra que está afectada. Aún bajo estas condiciones, se confirma un bajo impacto sobre el rendimiento de los cultivos y escasa residualidad.

Bibliografía

- Al-Adawi, S.S., Reeder, R.C., 1996. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. *Trans. ASAE* 39: 1641–1649.
- Álvarez C., Torres M., Chamorro E., D'ambrosio D., Taboada M. (2009) Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo* 27, 159-169.
- Benjamin J.G., Nielsen D.C., Vigil M.F. 2003. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. *Geoderma* 116: 137– 148
- Blake, G.R. y K.H. Hartge (1986). Bulk density. In Klute, A. (Ed.) *Methods of soil analysis, Part II, Physical and mineralogical methods, Second Ed.*, Agronomy No. 9, ASA, SSSA, p: 363-376.
- Botta, G, Joraujuria, D., Balbuena, R., Ressia, M., Ferrero, C., Rossato, H. y Tourn, M. (2006). Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus L.*) yields. *Soil and Tillage Research* 91: 164-172.
- Botta, G. F.; Tolon-Becerra, A.; Lastra-Bravo, X.; Tourn, M. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max L.*) yields in Argentinean pampas. *Soil and Tillage Research* 110: 167-174.
- Bradford, J.M. (1986). Penetrability, In Klute, A. (Ed.) *Methods of soil analysis, Part II, Physical and mineralogical methods, Second Ed.*, Agronomy No. 9, ASA, SSSA, p: 463-478.
- Bradford, J.M. (1986). Penetrability, In Klute, A. (Ed.) *Methods of soil analysis, Part II, Physical and mineralogical methods, Second Ed.*, Agronomy No. 9, ASA, SSSA, p: 463-478.
- Calonego, J. C.; Ciro R.A. 2010. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *European Journal of Agronomy* 33 242-249.
- Dane y Topp (eds.) *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods.* SSSA, Madison, Wisconsin, EE.UU. Second Ed., Agronomy No. 9, ASA, SSSA.
- Díaz-Zorita M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays L.*) productivity. *Soil and Tillage Research* 54: 11-19.
- Ferreras, L. A.; Costa, J. L.; Garcia, F. O.; Pecorari, C. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil and Tillage Research* 54: 31-39.
- Girardello, V., Carneiro, T., Santi, A., Cherubin, M., Kunz, J. y de Gregori T. (2014). Resistencia a penetração, eficiência de escarificadores mecânicos e produtividade de soja em latossolo argiloso manejado sob plantio direto de longa duração. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38: 1234-1244.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B., Elonen, P., Raghaven, G.S.V., Lowery, B., Van Wijk, A.L.M., Rasmussen, K., Riley, H., 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil Tillage Research* 10: 259–268.
- Ishaq, M., Ibrahim, M., Hassan, A., Saeed, M., Lal, R., 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil Till. Res.* 60, 153–161.
- Larson, W.E., Eynard, A., Hadas, A., Lipiec, J., 1994. Control and avoidance of soil compaction in practice. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production.* Elsevier, Amsterdam, pp.597–625.
- Martino, D. (1997) Siembra directa en los sistemas agrícolas ganaderos del Litoral Serie Técnica 82 Convenio INIA-PRENADER, INIA La Estanzuela.
- Micucci, F. G.; Taboada, M. A. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 86: 152-162.

- Motavalli, P., Stevens, W.E., Hartwig, G. 2003. Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. *Soil&TillageResearch* 71 121–131.
- Nicoloso S, Jorge T, Amado C, Schneider S, Lanzanova ME. 2008. Eficiência da escarificação mecânica e biológica na melhoria dos atributos físicos de um latossolo muito argiloso e no incremento do rendimento de soja. *Revista brasileira de Ciencia do Solo*, 32: 1723–1734.
- Palta JA, Chen X, Milroy SP, Rebetzke GJ, Dreccer F, Watt M. 2011. Large root systems: are they useful in adapting wheat to dry environments? *Functional Plant Biology*, 38: 347–354.
- Quiroga, A; Buschiazzo, D.; Peinemann, N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil and Tillage Research* 52:21-28.
- Reynolds W.D., Elrick D.E., y E.G. Youngs. 2002. Twin –or dual ring and multiple ring infiltrometers. In: Dane y Topp (eds.) *Methods of soil analysis. Part 4. Physical methods*. SSSA, Madison, Wisconsin, EE.UU.
- Sadras V.A., Garry J., O'Leary, Roget D.K. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research* 91: 131–148.
- Schneider F., Axel D., Hennings I., Schmittmann O., Seidel S. J. 2017. The effect of deep tillage on crop yield. What do we really know?. *Soil and Tillage Research* 174: 193–204.
- Torbert H.A., Wood, C.W., 1992. Effects of soil compaction and water-filled pore space on soil microbial activity and N losses. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 23, 1321–1331.
- Van Ittersum M. K., Cassman K.G, Grassini P., Wolf J., Tittonell P., Hochman Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research* 143, 4-17.
- Vazquez, L.; Myhre, D. L.; Gallaher, R. N.; Hanlon, E. A.; Portier, K. M. 1989. Soil compaction associated with tillage treatments for soybean. *Soil and Tillage Research* 13: 35-45.
- Voorhees, W.B. Voorhees, W.B., 2000. Long-term effect of subsoil compaction on yield of maize. In: Horn, R., van den Akker, J.J.H., Arvidsson, J. (Eds.), *Subsoil Compaction: Distribution, Processes and Consequences*. *Advances in Geoecology*, vol. 32. Catena, Reiskirchen, Germany, pp. 331–338.
- Wander, M. M., Bollero G. A. 1999. Soil Quality Assessment of Tillage Impacts in Illinois. *Soil Sci. Am. J.* 63, 961-971

INIA Dirección Nacional
Andes 1365 P. 12
Montevideo
Tel.: ++598 2902 0550
Fax: ++598 2902 3633
iniadn@inia.org.uy

INIA La Estanzuela
Ruta 50 Km. 11
Colonia
Tel.: ++598 4574 8000
Fax: ++598 4574 8012
iniale@le.inia.org.uy

INIA Las Brujas
Ruta 48 Km. 10
Canelones
Tel.: ++598 2367 7641
Fax: ++598 2367 7609
inia_lb@lb.inia.org.uy

INIA Salto Grande
Camino al Terrible
Salto
Tel.: ++598 4733 5156
Fax: ++598 4732 9624
inia_sg@sg.inia.org.uy

INIA Tacuarembó
Ruta 5 Km. 386
Tacuarembó
Tel.: ++598 4632 2407
Fax: ++598 4632 3969
iniatbo@tb.inia.org.uy

INIA Treinta y Tres
Ruta 8 Km. 281
Treinta y Tres
Tel.: ++598 4452 2023
Fax: ++598 4452 5701
iniatt@tyt.inia.org.uy