

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE LA DESCOMPACTACIÓN
SUB-SUPERFICIAL DEL SUELO SOBRE EL
RENDIMIENTO DE SOJA

por

Santiago BAROLIN ZANONI

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2018

Tesis aprobada por:

Director: -----
Ing. Agr. Oswaldo Ernst

Ing. Agr. (PhD.) Sebastián Mazzilli

Lic. Luciano Dabalá

Fecha: 18 de abril de 2018

Autor: -----
Santiago Barolin Zanoni

AGRADECIMIENTOS

A mi tutor, Oswaldo Ernst por todo su apoyo durante la elaboración de este trabajo, y a Pilar Etchegoimberry por su continua disposición y ayuda.

A mis familiares y amigos que de alguna u otra forma representaron un gran apoyo a lo largo de la carrera.

A mis padres.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
 1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	 1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1. GÉNESIS DE LA COMPACTACIÓN EDÁFICA	3
2.1.1. <u>Factores causales de la compactación</u>	3
2.1.2. <u>Factores predisponentes a la compactación</u>	4
2.2. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN SUB-SUPERFICIAL EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO	5
2.2.1. <u>Porosidad, densidad aparente y resistencia a la penetración</u>	5
2.2.2. <u>Conductividad hidráulica, difusión de oxígeno y capacidad de almacenaje de agua disponible</u>	6
2.3. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN SUB-SUPERFICIAL EN LOS CULTIVOS.....	7
2.3.1. <u>Efectos sobre la absorción y concentración de nutrientes en planta</u>	7
2.3.2. <u>Efectos sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos</u>	8
2.3.3. <u>Efectos sobre el rendimiento y sus componentes</u>	10
2.4. EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN	11
2.4.1. <u>Parámetro y metodologías para la evaluación de la compactación del suelo</u>	11
2.4.2. <u>Valores críticos de resistencia a la penetración sobre el crecimiento radicular y el rendimiento</u>	12
2.5. ESTRATEGIAS PARA SUBSANAR LA COMPACTACIÓN DEL SUBSUELO EN SISTEMAS DE SIEMBRA DIRECTA	13
2.5.1. <u>Descompactación mecánica mediante la labranza profunda</u>	14
2.5.2. <u>Laboreo biológico</u>	21
2.6. HIPÓTESIS	22
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	23

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EXPERIMENTAL	23
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS	23
3.3. MANEJO DEL CULTIVO	25
3.4. DETERMINACIONES	25
3.4.1. <u>Propiedades edáficas</u>	25
3.4.2. <u>Respuesta del cultivo</u>	26
3.4.3. <u>Datos climáticos</u>	26
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	27
3.5.1. <u>Descripción estadística general</u>	27
3.5.2. <u>Análisis estadístico general</u>	27
3.5.3. <u>Análisis espacial – control local</u>	27
3.5.4. <u>Análisis estadístico por zonas</u>	28
3.5.5. <u>Análisis de regresión lineal - rendimiento y resistencia a la penetración</u> ..	28
4. <u>RESULTADOS</u>	29
4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	29
4.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA GENERAL	31
4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO GENERAL	32
4.4. ANÁLISIS ESPACIAL – CONTROL LOCAL	36
4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR ZONAS	38
4.5.1. <u>Respuesta en la resistencia a la penetración</u>	38
4.5.2. <u>Respuesta del cultivo de soja</u>	40
4.6. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE RENDIMIENTO Y RP	42
5. <u>DISCUSIÓN</u>	44
6. <u>CONCLUSIONES</u>	46
7. <u>RESUMEN</u>	47
8. <u>SUMMARY</u>	48
9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	49

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Resumen de las investigaciones nacionales sobre el efecto de la descompactación sub-superficial en el rendimiento de cultivos.....	19
2. Manejo del cultivo – soja 2016/2017.....	25
3. Resumen de las variables medidas.....	31
4. Análisis estadístico de los efectos directos y residuales del paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo y respuesta del cultivo de soja.	32
5. Datos del semivariograma en base a la resistencia a la penetración del estrato 8-20 cm.	37
6. Análisis estadístico por zonas de los efectos directos y residuales del paraplow sobre la respuesta del cultivo de soja.	40

Figura No.

1. Croquis del experimento.....	24
2. Temperatura y precipitaciones en el período octubre 2016 – mayo 2017, medias históricas térmicas e hídricas del período 1980 – 2009 para la zona de Mercedes y alrededores, y ubicación temporal de las etapas fenológicas del cultivo.....	29
3. Efecto directo y residual del paraplow sobre la resistencia a la penetración (0-40 cm).	33
4. Mapa de calor del rendimiento.	35
5. Zonificación de la resistencia a la penetración del estrato 8-20 cm.....	36
6. Efecto directo y residual del paraplow sobre la resistencia a la penetración (0-40 cm) para las tres zonas.	38
7. Media de los rendimientos, por tratamiento y zona.	41
8. Regresión lineal entre rendimiento y resistencia a la penetración (8-20 cm).....	42
9. Regresión lineal entre rendimiento y resistencia a la penetración (8-20 cm) – zona RP alta.	43

1. INTRODUCCIÓN

Durante la década de los 90' comienza la adopción de la siembra directa en el Uruguay, donde ya en el año 2000 más del 35 % de la agricultura en el litoral oeste se desarrollaba sin laboreo, representado quizás el cambio tecnológico más importante en cuanto a incorporación de técnicas de manejo del suelo. A partir del 2002, la agricultura se intensificó y expandió, sustituyendo al tradicional sistema de rotación de cultivo y pasturas. Se ha definido a este proceso evolutivo de la agricultura uruguaya, como un cambio hacia un sistema de agricultura continua bajo siembra directa, con una mayor intensidad de uso de suelo, con el cultivo de soja como elemento central en el crecimiento del área. La introducción de la siembra directa en la región, tuvo como objetivos principales controlar las pérdidas de suelo por erosión, aumentar la eficiencia en el uso del agua de los cultivos de verano y reducir la pérdida de productividad de los cultivos en general. Sin embargo, se ha constatado que estos cambios en conjunto generaron limitantes físicas en el suelo, asociados a procesos de degradación, los cuales hacen que se mantenga la pérdida de productividad, y se reduzca la eficiencia de uso del agua en los cultivos.

Se ha demostrado que el factor físico más limitativo en sistemas de estas características en Uruguay ha sido la compactación sub-superficial del suelo, medida principalmente a través de la resistencia a la penetración (RP). Se define a ésta como un incremento de la impedancia mecánica del suelo para el desarrollo de raíces de los cultivos, la que reduce principalmente la capacidad de utilización del agua almacenada en capas profundas del suelo. Además, se ha probado que la cantidad de agua y disponibilidad de nutrientes puede ser menor en un suelo con compactación sub-superficial. Se reconoce a la compactación del suelo como un problema actual e importante en la agricultura de la región, debido además a su alta persistencia. En la actualidad esto podría estar limitando los rendimientos en buena parte de los sistemas agrícolas en el país.

El uso de subsoladores (labranza profunda) surge como alternativa para solventar esta problemática, demostrándose que en ciertas condiciones puede reducir realmente la resistencia a la penetración de un suelo al crecimiento radicular. Esta labor tiene lugar en sistemas de siembra directa, dado implementos como el "paraplow", capaces de soltar el suelo sin generar grandes distorsiones en la superficie. En resumen, este tipo de labranza permite preservar la cobertura vegetal, minimizar los efectos negativos sobre los agentes formadores de bio-canales y lograr una mayor exploración radical, pudiendo generar aumentos en la captura de los recursos, y con ellos aumentos en el crecimiento y rendimiento de los cultivos.

Aun así, la mejora en la estructura lograda a través del laboreo profundo es en general transitoria, particularmente en suelos degradados, con bajo contenido de materia orgánica y pobre estabilidad de agregados. Además, en caso de que la compactación no

sea efectivamente una limitante, el subsolado del suelo no genera incrementos en la disponibilidad de agua y tampoco provoca una mejora de los rendimientos, por lo cual es fundamental evaluar el nivel de compactación para prever la eficiencia de la labor.

Los objetivos de este trabajo son: (a) evaluar el efecto del subsolador tipo paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo, y sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de soja (*Glycine max* L.), (b) identificar zonas con respuesta diferencial a la descompactación cuantificando la respuesta en el cultivo y (c) cuantificar la duración del efecto positivo de la descompactación sobre la resistencia a la penetración del suelo y sobre el cultivo.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. GÉNESIS DE LA COMPACTACIÓN EDÁFICA

La compactación es un proceso de degradación estructural del suelo, que se encuentra prácticamente en todos los sistemas agrícolas del mundo (Soane y van Ouwekerk, 1994), reconocida como la consolidación física del suelo por una fuerza aplicada, capaz de destruir los agregados (Wolkowski y Lowery, 2008). Este proceso se produce cuando las partículas del suelo se presionan entre sí, reduciendo el espacio de poros entre ellas (DeJong-Hughes et al., 2001).

2.1.1. Factores causales de la compactación

Un suelo compactado puede generarse naturalmente por sedimentación del suelo o puede ser inducida por otros agentes compactadores como la labranza, el tráfico de maquinaria, el pisoteo por animales y el fuego (Kozłowski 1999, Martino 2001).

DeJong-Hughes et al. (2001) establecieron tres diferentes tipos de compactación, según el factor causal.

- Compactación superficial, generada principalmente por el impacto de la lluvia, denominada consolidación natural. Lo que se produce es una estructura laminar en la superficie del suelo nombrada “costra” (por lo general no más de 1,3 cm de espesor), que tiene como principal consecuencia un efecto negativo en la implantación de los cultivos. Sin embargo, en un estudio bajo siembra directa realizado por Botta et al. (2016), se concluyó que la emergencia de las plántulas de soja no fue afectada por la compactación superficial del suelo, por más que ésta haya sido relativamente elevada.
- “Suela de arada”, provocada por operaciones de labranza (generalmente por arado de vertedera o disquera) realizadas continuamente a la misma profundidad, ocasionando capas compactadas justo por debajo del perfil trabajado. Esta capa suele ser relativamente delgada (1,3 cm de espesor), si bien puede no tener un efecto significativo en la producción de cultivos, puede ser aliviada variando la profundidad de la labranza.
- Compactación sub-superficial, provocada principalmente en suelos con mucha historia de agricultura sin laboreo, teniendo como principal componente causal, el tráfico de ruedas y el aumento del peso de los tractores en los últimos años. Se la determina como la causa más importante de compactación en la agricultura. En contraste con la compactación superficial, ésta persiste por más tiempo, y puede causar reducciones permanentes en los rendimientos de los cultivos (Botta et al., 2016).

La actual tendencia mundial y nacional hacia la adopción de sistemas agrícolas basados en la siembra directa de los cultivos, como se discutió anteriormente, puede implicar la ocurrencia de problemas de compactación sub-superficial, asociados principalmente al tráfico de maquinarias (Martino 2001, Morón y Quincke 2010). Según Soane et al. (1981), la magnitud de este proceso dependerá de las propiedades intrínsecas del suelo, del neumático y de las complejas interacciones que ocurran entre ellos.

Por otro lado, en los sistemas tradicionales de producción basados en el laboreo, los problemas de compactación sub-superficial son en cierta forma disimulados, al menos durante breves períodos de tiempo (Martino, 2001). Sin embargo, Hernández et al., citados por Gutiérrez et al. (2014) afirman que la mayor aireación producto de la labranza convencional, se pierde rápidamente cuando el suelo se humedece, dado que es menor el porcentaje de macroporos estables que quedan a diferencia de un suelo en siembra directa.

2.1.2. Factores predisponentes a la compactación

Existen características relacionadas al tipo de sistema de producción y otro que son intrínsecas del suelo, las cuales determinan la predisposición de un suelo a ser compactado. Con respecto a las características relacionadas al sistema productivo, una rotación con bajo número de cultivos diferentes, afecta negativamente la estabilidad de los agregados del suelo, aumentando la susceptibilidad a la compactación, debido a los limitados sistemas de enraizamiento producidos (DeJong-Hughes et al., 2001). La labranza agresiva también aumenta la susceptibilidad de un suelo a la compactación porque reduce la estabilidad de los agregados (Wolkowski y Lowery, 2008). En general suelos sin una buena estructura, con partículas individuales, son más susceptibles a presiones externas que generan compactación (DeJong-Hughes, s.f.).

Por otro lado, las principales características intrínsecas del suelo vinculadas a la susceptibilidad de compactación son, el contenido de humedad, el contenido de materia orgánica y la textura del suelo. Al aumentar el contenido de humedad del suelo aumenta la susceptibilidad de este a ser compactado (Bakker y Davis, Lipiec et al., citados por Hamza y Anderson 2005, Wolkowski y Lowery 2008). Los suelos con bajo contenido de materia orgánica tienden a ser más susceptibles a la compactación al no formar agregados fuertes (Wolkowski y Lowery 2008, Gutiérrez et al. 2014), como así también los suelos de texturas finas tienden a ser más susceptibles (Harris 1971, Håkansson et al. 1987), donde además la persistencia del daño realizado suele ser mayor (Botta et al., citados por Gutiérrez et al., 2014).

A todo esto, Martino (2001) sostiene que para muchos sistemas productivos en Uruguay, los cuales cuentan con historias de más de una década de agricultura sin rotación con pasturas y sin laboreo, pueden estar limitados por la ocurrencia de

restricciones físicas del suelo asociadas a procesos degradativos. Principalmente limitados por la compactación sub-superficial del suelo, producto del frecuente tráfico de maquinaria, conjunto a otros factores como la presencia de suelos de texturas medias a pesadas, con baja capacidad de infiltración de agua y el clima húmedo. Sawchik (2007), también concluye que esta combinación de factores que caracteriza a la agricultura en el Uruguay, determina un alto riesgo de ocurrencia de estos problemas en el país.

2.2. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN SUB-SUPERFICIAL EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

El reordenamiento y posterior destrucción de los agregados, producto de la consolidación física del suelo (compactación), genera una reducción del tamaño, cantidad y continuidad de los macroporos del suelo, por ende, disminuye el volumen que ocupan los macroporos en el suelo (Soane et al., 1981). Esta pérdida de espacio poroso entre agregados, afecta ciertas propiedades del suelo como: la densidad aparente, la resistencia a la penetración, la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenaje de agua disponible para las plantas (Sadras et al., 2005). También afecta aquellas propiedades asociadas al intercambio gaseoso y la aireación (difusión de oxígeno), el movimiento del calor y la actividad biológica (Allmaras et al., 1994).

La zona más frecuente de compactación sub-superficial severa, causada por el tráfico de maquinaria, suele estar por debajo de los 25 cm de profundidad del perfil del suelo y se puede extender hasta los 50 cm (Voorhees et al., Lowery y Schuler, Gameda et al., citados por Evans et al. 1996, Alakukku, citado por Botta et al. 2004, Jorajuría et al., citados por Gutiérrez et al. 2014).

2.2.1. Porosidad, densidad aparente y resistencia a la penetración

El primer impacto de la compactación es la pérdida de espacio de poros entre los agregados, a medida que el volumen del suelo disminuye (Cruse y Gupta, citados por Allmaras et al., 1994). En la siguiente etapa se produce una trituración de agregados individuales (espacio poroso intra-agregado) a medida que el volumen del suelo se reduce más, aumentando así la densidad aparente (Allmaras et al., 1994).

Son muchas las investigaciones que han demostrado que la compactación se puede ver como un aumento de la densidad aparente del suelo (Soane et al. 1981, Allmaras et al. 1994, da Silva et al. 1997, Ishaq et al. 2001a, Sadras et al. 2005, Botta et al. 2006b, Singh et al. 2015), o sea que disminuye el volumen del suelo mediante la compresión de sus partículas (Chaudhary et al., citados por Singh et al., 2015). da Silva et al. (1997), afirman que la densidad aparente es afectada fuertemente por el tráfico de maquinaria, la textura del suelo y el contenido de materia orgánica, siendo el tráfico de maquinaria el factor más determinante en el aumento de la densidad aparente del suelo.

La resistencia a la penetración o impedancia mecánica, es otra propiedad afectada por la compactación, siendo de las más utilizadas para cuantificar este proceso. La densidad aparente es la función de la porosidad total del suelo, pero la RP es la interacción de muchos factores o propiedades del suelo tales como densidad aparente, contenido de agua, textura del suelo, estructura del suelo, mineralogía de arcillas, contenido de materia orgánica, etc. (Quiroga et al. 1999, Singh et al. 2015). Cuanto mayor es la compactación generada, mayor será la RP, mientras que la porosidad total disminuye progresivamente, como consecuencia de la reducción de la macroporosidad (Ishaq et al., 2001a).

2.2.2. Conductividad hidráulica, difusión de oxígeno y capacidad de almacenaje de agua disponible

La compactación modifica el estado de agregación y las interacciones existentes entre las fases sólida, líquida y gaseosa, disminuyendo la conductividad, la permeabilidad y la difusión del agua y del aire a través del sistema poroso (Soane et al., 1981). Singh et al. (2015) concluyen que la conductividad hidráulica está directamente correlacionada con la macroporosidad, y que la micro-porosidad se incrementa a expensa de la macroporosidad al compactarse el suelo. Esto resulta que, un suelo compactado tenga frecuentemente mayor espacio interno cubierto con agua, quedando así menor espacio interno cubierto por aire, en comparación al mismo suelo con menor grado de compactación (Ishaq et al., 2001a). Por ende, el suministro de oxígeno a las raíces también se ve afectado negativamente por la compactación, dado que éste depende de la existencia de un sistema continuo de poros ocupados por aire, siendo el contenido de humedad y el tamaño y distribución de poros propiedades de los suelos que afectan directamente la aireación de las raíces (Martino, 2001).

La velocidad de infiltración también se ve influenciada por la estabilidad de la estructura del suelo, por ende, afectada por la compactación del suelo (Dexter 1988, Letey, citado por Martino 1997), dado que la estructura edáfica afecta el drenaje de la capa compactada que es el que determina la velocidad de infiltración de todo el perfil (DeJong-Hughes et al., 2001). Al reducirse la tasa de infiltración se genera un aumento en las pérdidas de agua por escurrimiento, aumentando el riesgo de erosión hídrica del suelo o en caso contrario el suelo permanece inundado durante más tiempo siendo éste otro aspecto negativo producto de la compactación (Jorajuría y Draghi 1997, Gutiérrez et al. 2014). Además, la reducción de la tasa de infiltración aumenta las pérdidas por escurrimiento, disminuyendo así el ingreso de agua al suelo y por ende reduciendo también la reserva disponible para los cultivos (Gil et al., Bacigaluppo y Gerster, citados por Gutiérrez et al., 2014).

Estudios como los de Sadras et al. (2005), Canarache et al., citados por Singh et al. (2015), han reportado también disminuciones en la capacidad de almacenaje de agua disponible para la planta como consecuencia de la compactación. Esto se debe a que la

capacidad de almacenaje de agua disponible para la planta que tiene un suelo, depende principalmente de su profundidad y estructura (Alliaume et al., 2013). La compactación limita la profundidad que alcanza el sistema radicular por lo cual la disponibilidad hídrica desciende conforme se acorta ésta (Ishaq et al., 2001b). Por otro lado, dicho proceso también tiene influencia negativa sobre la estructura del suelo (Martino, 2001), generando aumentos del punto de marchitez permanente, y disminuciones en el contenido de agua a saturación, por ende, la compactación genera reducciones en la capacidad de almacenaje de agua disponible para las plantas (Liebing et al., citados por Gutiérrez et al., 2014). Pero más importante aún, es considerar el concepto de “rango no limitativo de disponibilidad de agua” (LLWR por sus siglas en inglés “least limiting water range”) descrito por Letey, citado por Martino (2001), el cual define a la capacidad de almacenaje de agua disponible como la cantidad de agua retenida entre dos límites. El límite superior corresponde al contenido de humedad con cual la disponibilidad de oxígeno se vuelve insuficiente para el crecimiento radicular (menos de 10 % del volumen del suelo ocupado por aire, Grable, citado por Martino, 2001), en caso de que este valor fuera inferior al correspondiente a capacidad de campo. Mientras que el límite inferior, se define como el contenido de humedad al cual la resistencia mecánica del suelo impide el crecimiento de las raíces, en aquellas situaciones en que este valor resulte superior al correspondiente a marchitez permanente. Es relevante considerar esto dado que la compactación tiende a disminuir la distancia entre ambos límites, disminuyendo el rango no limitativo de disponibilidad de agua, también denominado intervalo hídrico óptimo (da Silva y Kay 1996, Martino 2001, Pilatti et al. 2012).

2.3. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN SUB-SUPERFICIAL EN LOS CULTIVOS

Los efectos de la compactación sub-superficial pueden ser acumulativos y lograr disminuir la productividad del suelo y por ende generar mermas en el rendimiento de los cultivos (Soane y van Ouwerkerk 1994, Castillo et al., citados por Ishaq et al. 2001b).

2.3.1. Efectos sobre la absorción y concentración de nutrientes en planta

En suelos compactados la absorción de nutrientes se ve limitada como consecuencia de un sistema radicular severamente restringido, ocurriendo una reducción de la eficiencia del uso de los nutrientes por parte de la planta (Ishaq et al., 2001b). Lowery y Schuler, citados por Ishaq et al. (2001b), estudiaron el efecto de la compactación en la absorción total de nutrientes por el maíz, y encontraron que la absorción de N y K se ve decrecida en los suelos compactados, mientras que el Fe y Mn incrementaron conforme incrementaba la compactación. Ishaq et al. (2001b) también encontraron diferencias en la absorción de nutrientes como consecuencia de la compactación, donde los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) tuvieron reducciones

de absorción de N, P y K en torno a 12-35 %, 17-27 % y hasta 24 % respectivamente, en aquellos suelos previamente compactados. Mientras que en los cultivos de sorgo se detectaron reducciones del 23 % N, 16 % para P y 12 % para K también para los suelos de alta impedancia mecánica.

Por otro lado, Lowery y Schuler, citados por Ishaq et al. (2001b), también encontraron que el contenido de N, P y K en hoja, no se diferenció entre el tratamiento compactado y el testigo, en comparación con Bennie y Krynauw, citados por Díaz Zorita (2000) quienes sí describieron reducciones en las concentraciones de nutrientes foliares, lo cual afectó a los rendimientos de los cultivos en suelos compactados.

Motavalli et al. (2003) citan algunos estudios que han documentado incrementos en la desnitrificación o en la producción de N_2O en suelos compactados, lo que sería una mayor pérdida de este nutriente como efecto de la compactación. Señalan además un posible aumento de las pérdidas de N como resultado de la mayor escorrentía superficial en suelos compactados, debido a una menor infiltración de agua.

2.3.2. Efectos sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos

La compactación del suelo no tiene un efecto directo en el desarrollo de las raíces, pero si se ve afectado indirectamente, a través de los cambios en la estructura del suelo, como por ejemplo por los cambios provocados sobre: el patrón de agrietamiento, la resistencia a la penetración del suelo, la porosidad total, el número de macroporos, la capacidad de almacenaje de agua disponible, la conductividad hidráulica del suelo, la tasa de difusión de oxígeno y demás (Taylor y Brar, 1991). Aun así, para Letey, citado por Martino (2001) si bien todas estas variables influyen en el crecimiento de raíces, en última instancia son la resistencia mecánica y la disponibilidad de agua, oxígeno y energía las cuatro propiedades fundamentales que gobiernan el crecimiento radicular.

La compactación del suelo genera cambios en la morfología y fisiología del sistema radicular de la planta por una serie de mecanismos biológicos, químicos o físicos. De hecho, la morfología de un sistema de raíces responde tan fácilmente a su entorno que es mínima la fuerza necesaria que se debe aplicar a un suelo suelto y bien estructurado, para que ésta sea alterada (Taylor y Brar, 1991). Se ha observado que las raíces que han estado creciendo en suelos de elevadas resistencias mecánicas, tienden a tener diámetros mayores (Materechera et al., citados por Whalley et al., 1995), a contorsionarse (Kirkegaard et al., citados por Martino, 2001) y por momentos a crecer horizontalmente (Dexter, 1988). Sin embargo, un cambio en la apariencia del sistema radicular no necesariamente causa una alteración en el crecimiento o rendimiento de la planta o cultivo sobre el suelo, ya que un sistema radicular reducido como consecuencia de la compactación puede aun así suministrar toda el agua y los nutrientes necesarios para la planta (Taylor y Bar, 1991).

Un suelo con compactación sub-superficial puede generar cambios en la distribución de las raíces en el perfil del suelo, lo que podría limitar la absorción de nutrientes y agua por la reducción del volumen de suelo que es explorado por la planta, al concentrarse las raíces en la capa superior de este (Dexter 1988, Hammel, citado por Díaz Zorita 2000). Esto se demostró muy claramente en el estudio de Whalley et al. (1995) sobre maíz, donde encontraron que, en dos suelos de resistencia mecánica contrastantes, la biomasa total de las raíces no se diferenció, pero el suelo no compactado tuvo una mayor proporción de las raíces en profundidad.

Son varios los autores que encontraron una correlación negativa entre la longitud de la raíz de distintas especies (trigo - *Triticum aestivum* L.; sorgo - *Sorghum bicolor* L.; cebada - *Hordeum vulgare* L.; maíz - *Zea mays* L.) y la impedancia mecánica o la densidad aparente del suelo, como forma de expresar la compactación sub-superficial del suelo (Taylor y Brar 1991, Whalley et al. 1995, Ishaq et al. 2001b, Botta et al. 2013, Botta et al. 2016). La magnitud de este proceso varía con la especie, dado que existe cierta variabilidad inter-específica en la tolerancia de resistencia a la penetración, la cual se relaciona con el diámetro de las raíces y su interacción con la geometría de los poros del suelo. Los sistemas radicales fibrosos como las de las gramíneas, dado su reducido diámetro, serían más aptos para desarrollarse en suelos con alta resistencia a la penetración a diferencia de los sistemas radicales con raíces pivotantes (Martino, 2001), como las raíces de las plantas dicotiledóneas de cultivos anuales (por ejemplo, la soja), las cuales son las más sensibles a las condiciones del suelo, especialmente a la compactación (Arvidsson y Håkansson, citados por Botta et al., 2016).

En un estudio de los efectos de la compactación sub-superficial del suelo sobre el crecimiento de las raíces de soja (*Glycine max* L.) cultivada en un suelo franco arenoso, Rosolem y Takahashi, citados por Hamza y Anderson (2005) afirmaron que la compactación sub-superficial condujo a un aumento en el crecimiento de la raíz en la capa superficial del suelo, conjunto a una reducción del crecimiento total del sistema radicular en todo el perfil, en un 10 % cuando la RP promedio del suelo era de 520 kPa (densidad aparente de 1,45 Mg m⁻³) y en un 50 % cuando la RP promedio del suelo fue de 1450 kPa (densidad de 1,69 Mg m⁻³).

Por otro lado, Lowery y Schuler (1994), estudiaron el efecto de la compactación, sobre el crecimiento de cultivos de maíz (*Zea mays* L.), y encontraron que la altura de la planta madura disminuyó con cada nivel creciente de compactación. Bingham, Passioura, citados por Sadras et al. (2005) relacionan esta reducción de crecimiento con la reducción de la conductancia estomática y de las tasas de división celular, de expansión celular y de aparición de hojas. Todo esto, según Sadras et al. (2005) genera reducciones drásticas de la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa y reducciones también de la transpiración total.

Trewavas, citado por Sadras et al. (2005), describió que la reducción de la disponibilidad de recursos en suelos compactados, es la causa principal de la merma del crecimiento de la parte aérea producto de la compactación del sub-suelo. Aun así, también existe evidencia de que esta reducción del crecimiento de la parte aérea puede deberse a hormonas producidas en las raíces y no necesariamente ser consecuencia de la reducción de la captura y disponibilidad de agua y nutrientes, producto de la limitada exploración radicular (Masle y Passioura, citados por Whalley et al., 1995).

2.3.3. Efectos sobre el rendimiento y sus componentes

Dentro del esquema realizado por Ernst y Siri (2011) sobre los factores modificadores de la producción de biomasa, se podría calificar a la compactación sub-superficial como un factor restrictivo del rendimiento, dado que lo que genera este proceso es una alteración en la calidad del suelo, teniendo como principal efecto la reducción de la disponibilidad de agua y nutrientes (Trewavas, citado por Sadras et al., 2005). Si bien esto indicaría que un suelo al compactarse es menos productivo que su estado original, la relación entre la compactación del suelo y los rendimientos no siempre es directa, debido a que interactúan una serie de factores, como el tipo de suelo, y el contenido de agua, aire y nutrientes en el suelo en forma conjunta en los diferentes estadios de crecimiento de la planta y diferentes niveles de compactación (Gil et al., citados por Gutiérrez et al., 2014).

Ishaq et al. (2001b) en un experimento donde la compactación del suelo fue creada artificialmente, demostraron que los rendimientos de los cultivos pueden reducirse debido al aumento de la resistencia del suelo al crecimiento de las raíces, la cual tiene como consecuencia disminuciones de la disponibilidad de agua y nutrientes para las plantas. Díaz Zorita (2000) encontró también que incrementos en la compactación del suelo, medida como densidad aparente, pueden reducir los rendimientos de maíz (*Zea mays* L.), lo cual lo relacionó a la reducción de volumen de suelo disponible para el desarrollo de raíces. Unger y Kaspar, citados por Díaz Zorita (2000) concluyen además reducciones del crecimiento y rendimiento de las plantas, como consecuencia de una reducción de la infiltración de agua y aireación, e incrementos de la presión de enfermedades producto del incremento de la compactación sub-superficial.

Lowery y Schuler (1994), en un estudio sobre el crecimiento de cultivos de maíz (*Zea mays* L.) encontraron que el rendimiento disminuyó con cada nivel creciente de compactación, conjunto a la disminución de la altura de la planta madura. En otro estudio realizado por Botta et al. (2013), el rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) disminuyó entre 11 y 14 % a medida que la compactación aumento. Díaz Zorita, citado por Díaz Zorita (2000) también encontró que los rendimientos de granos de maíz (*Zea mays* L.) disminuyeron entorno al 70 %, cuando la profundidad sobre la capa endurecida disminuyó de 65 a 45 cm. Los rendimientos de trigo (*Triticum aestivum* L.) y sorgo

(*Sorghum bicolor* L.) también pueden ser reducidos como consecuencia de la compactación sub-superficial, donde la reducción promedio del estudio llevado a cabo por Ishaq et al. (2001a) fue del 23 % y 18 % respectivamente, no afectando el peso de grano, sino más bien el número de grano por unidad de superficie.

Para soja (*Glycine max* L.), Botta et al. (2004) concluyeron que aumentos en la intensidad de tráfico de ruedas de maquinaria agrícola reducen progresivamente el rendimiento, cuyos resultados mostraron reducción del rendimiento en torno a 9,8 y 38 %, donde los tratamientos tomaron valores de RP de: 1200-1500 kPa entre 0-8 cm, 1400-1700 kPa entre 8-20 cm y 1400-1900 kPa entre 20-40 cm, a diferencia del control cuyos valores obtenidos fueron: 1000, 1150 y 1350 kPa respectivamente. Esta tendencia a la reducción del rendimiento también fue descrita en el estudio realizado por Siczek y Lipiec (2011), donde además demostraron una merma de la fijación simbiótica de nitrógeno, asociado principalmente a la menor aireación del suelo producto de la compactación generada con el tráfico de ruedas.

2.4. EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN

De acuerdo con Corwin et al. (2006), existe una necesidad global de desarrollar herramientas que evalúen la calidad del suelo para determinar la efectividad y sostenibilidad de las prácticas agrícolas de manejo. De acuerdo a esto, determinar el estado de compactación de un suelo, permite definir la traficabilidad, la susceptibilidad a la erosión y la aptitud de este para el crecimiento de los cultivos (Schafer et al., citados por Martino, 1997). Considerando esto, Martino (1994) señala que el nivel conveniente de compactación con propósito agrícola, es aquel que permita un adecuado tráfico de maquinarias, sin restringir severamente la capacidad de infiltración y almacenaje de agua, la aireación del suelo y el normal desarrollo de las raíces.

2.4.1. Parámetro y metodologías para la evaluación de la compactación del suelo

La densidad aparente es uno de los parámetros más utilizados para determinar la presencia de capas compactadas en suelos agrícolas (Díaz Zorita, 2000). Sin embargo, este parámetro es poco sensible ante cambios producidos por elevadas presiones ejercidas en superficie (Alakukku, citado por Gutiérrez et al., 2014).

Otro de los indicadores que se utilizan para inferir el nivel de compactación de un suelo es la conductividad hidráulica, la cual se correlaciona de forma positiva con la cantidad y tamaño de poros. Sin embargo, su determinación insume mucho tiempo y resulta altamente variable, por lo cual deben ser tomadas una gran cantidad de muestras, lo cual dificulta su aplicación práctica (Morgan et al., 1993).

También las raíces son indicadores de respuesta biológica frente a situaciones de compactación, las cuales como ya fue mencionado tienden a crecer más

vigorosamente en las zonas que muestran menos resistencia física (Botta et al., 2016), pudiendo modificar su morfología ante variaciones en la compactación del suelo (Martino, 2001).

Morgan et al. (1993), también incluyen a la aireación (permeabilidad del aire) como otra propiedad del suelo afectada por la compactación. Variable de alta sensibilidad a los cambios en la porosidad y densidad aparente, y la cual se puede medir rápidamente. Por lo tanto, es factible su uso como un índice de compactación (Nau, Morgan, citados por Morgan et al., 1993).

Por último, el indicador más utilizado en las investigaciones (conjunto a la densidad aparente) es la resistencia a la penetración (Díaz Zorita, 2000), el cual cuantifica la cantidad de fuerza requerida para introducir un cono a través del suelo (Lowery y Schuler, citados por Cazorla y Masiero, 2006). Cuanto mayor sea este valor, mayor será el nivel de compactación que tenga un suelo, indicando reducciones progresivas en la porosidad total y la porosidad llena de aire que tenga un suelo (Ishaq et al., 2001a).

Los penetómetros de cono de penetración estática son los instrumentos más comúnmente utilizados para medir la RP (Martino, 1998). Son útiles y rápidos, pero tienen limitaciones, ya que los valores de RP medidos puede diferir con las propiedades reales del suelo al ser afectada la medición por diversos factores como: la densidad aparente, el contenido de agua, la textura del suelo, la estructura del suelo, la mineralogía de arcillas, el contenido de materia orgánica, la velocidad de penetración y las características del cono utilizado (Quiroga et al. 1999, Singh et al. 2015, Botta et al. 2016). Conocer como interviene cada uno permite determinar el momento de muestreo adecuado y permite además interpretar los datos de forma acertada (Martino 1998, Cazorla y Masiero 2006). Más allá de que sean muchas las variables que inciden en los valores de la RP, varios autores consideraron que es un buen parámetro indicador para evaluar la compactación del suelo, siendo además más sensible en comparación con la densidad aparente (Morgan et al. 1993, Motavalli et al. 2003, Cazorla y Masiero 2006, Gutiérrez et al. 2014, Botta et al. 2016). A su vez, se clasifica al penetómetro de cono como una valiosa herramienta experimental que provee satisfactorias estimaciones empíricas de la resistencia mecánica del suelo, particularmente si se combina con información acerca de la porosidad y la distribución del tamaño de los poros (Martino, 2001).

2.4.2. Valores críticos de resistencia a la penetración sobre el crecimiento radicular y el rendimiento

Son complejas las interacciones entre los diferentes tipos de suelo, especies vegetales y técnicas experimentales, para contemplar todos los factores físicos del suelo y determinar un valor crítico de resistencia a la penetración, por encima del cual no se

produce crecimiento de raíces. Motivo por lo cual numerosos trabajos de investigación, obtuvieron valores muy variados, los cuales oscilaron entre 1000 y 5600 kPa (Martino, 2001).

A medida que la resistencia a la penetración disminuye por debajo del nivel crítico, la tasa de elongación de las raíces aumenta exponencialmente, teniendo efecto aún a niveles muy bajos, por lo cual se infiere que el efecto de la resistencia del suelo en el crecimiento de las raíces es relativamente cuantitativo (Bengough y Mullins, Taylor y Gardner, Taylor et al., citados por Martino, 2001).

Por otro lado, el umbral crítico para el rendimiento de los cultivos indicaría el nivel máximo de RP con el cual el rendimiento del cultivo no estaría limitado por la impedancia física del suelo. Dicho de otra forma, sería el nivel de RP a partir del cual se espera respuesta del rendimiento por el efecto de la descompactación del perfil compactado (Gutiérrez et al., 2014).

A nivel nacional, en un trabajo de tesis de grado, ubicado en el departamento de Soriano, se encontró respuesta del rendimiento al subsolado con paraplow en zonas que tenían en promedio valores de RP (entre 20-40 cm de profundidad) iguales o superiores a 1450 kPa, determinado este valor como el umbral de RP para rendimiento de soja (*Glycine max* L., Mozzaquatro y Raffo, 2016).

A modo general, Ehlers et al., Vepraskas, Gupta y Allmaras, Boone et al., citados por Díaz Zorita (2000), Thereadgill, citado por Gutiérrez et al. (2014) indican que, si los valores son mayores de 2000 kPa a campo, la resistencia del suelo puede ser un problema para el crecimiento normal de raíces y brotes, pudiendo repercutir sobre el rendimiento de los cultivos.

2.5. ESTRATEGIAS PARA SUBSANAR LA COMPACTACIÓN DEL SUBSUELO EN SISTEMAS DE SIEMBRA DIRECTA

Los sistemas de siembra directa en las condiciones agrícolas uruguayas, como ya fue mencionado, son en general sensibles a sufrir problemas asociados a las propiedades físicas de los suelos, donde la compactación del sub-suelo es el problema que se genera con mayor frecuencia. Una vez generado este inconveniente en la estructura del suelo, mayor será el tiempo requerido para su remediación en cuanto más extrema sea la situación de la cual se parta, por lo cual acelerar este proceso es clave para mantener la viabilidad de estos sistemas (Martino, 2001).

Entre las diversas opciones para remediar la compactación del subsuelo en sistemas de agricultura continua, se encuentran como las más utilizadas y efectivas: (1) la labranza profunda y (2) la selección de rotaciones de cultivos con plantas de raíces profundas capaces de desarrollar sus raíces en suelos con altos niveles de compactación,

lo cual es considerado como “laboreo biológico” (Dexter 1991, Martino 2001, Motavalli et al. 2003, Sawchik 2007).

2.5.1. Descompactación mecánica mediante la labranza profunda

Se ha demostrado que la labranza profunda con paraplow puede reducir efectivamente la impedancia mecánica del suelo bajo sistemas de siembra directa (Martino 1998, Díaz Zorita 2000, Gutiérrez et al. 2014). Esto genera un aumento de la exploración radicular lo que permitiría aumentar la captura de los recursos, y con ellos aumentar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Díaz Zorita 2000, Ishaq et al. 2001b, Sadras et al. 2005).

2.5.1.1. Características de la descompactación sub-superficial con paraplow

El paraplow es una herramienta de subsolado de brazos rígidos desarrollada en Inglaterra hace dos décadas (Pidgeon, citado por Martino, 2001), diseñada para aflojar suelos compactados y así poder incrementar los rendimientos de los cultivos (Botta et al., 2006a). Los subsoladores de uso agrícola normalmente trabajan hasta una profundidad de 50 cm, sin generar grandes disturbios en la superficie, por lo tanto, permite conservar buena parte de la cobertura vegetal siendo una herramienta que puede ser utilizada en sistemas de siembra directa (Martino 2001, Gutiérrez et al. 2014). Aun así, Reeder et al., citados por Motavalli et al. (2003) consideran que es posible que se genere una mezcla entre la capa superficial del suelo con la del sub-suelo, pudiendo disminuir los niveles totales de materia orgánica del suelo en la superficie, lo que se interpreta como una desventaja del subsolado.

Se recomienda que la práctica se realice cuando el suelo esté suficientemente seco para evitar la formación de terrones grandes, manchas y adherencia del suelo al implemento de labranza (Larson et al., citados por Motavalli et al., 2003). Por lo cual, en Uruguay, no es posible realizar esta práctica en cualquier momento del año, ya que las condiciones para su implementación no son constantemente óptimas dado la variabilidad climática interanual (García Préchac et al., 2004).

Por último, es de importancia considerar también que el subsolado es una labor de alto costo y que sólo se recomienda realizar cuando las características del suelo lo justifiquen (Gutiérrez et al., citados por Gutiérrez et al., 2014).

2.5.1.2. Efecto del paraplow sobre las propiedades físicas del suelo

Porosidad y aireación

En un estudio sobre suelos franco limo-arcillosos en Uruguay, Martino (1998) observó que el paraplow generó un aumento en la porosidad, el cual se debe casi exclusivamente al incremento de los macroporos, al igual que el estudio de Hipps y

Hodgson, citados por Martino (2001) en el cual se reportó un incremento de 7,8 a 13,3 % en el volumen de poros mayores a 60 μm en un suelo franco areno-arcilloso, lo cual genera un aumento en el flujo de oxígeno dentro del subsuelo.

Densidad aparente y resistencia a la penetración

Martino (1998) también demostró que el paraplow pasado a 45 cm de profundidad disminuyó significativamente la densidad aparente. Resultados similares fueron descritos en el trabajo de Vallejos et al. (2014) realizado sobre suelos Franco-Limosos en el sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina), donde las mayores diferencias producto del laboreo profundo se encontraron en el espesor de 12 a 17 cm. Sin embargo, Álvarez et al. (2009) en condiciones similares de suelo y manejo, no observaron diferencias significativas en la densidad aparente como efecto de la descompactación con paratill, debido a una baja sensibilidad de este parámetro a los distintos manejos, según lo concluido por los autores. Mientras que la resistencia a la penetración fue la variable que presentó mayor sensibilidad a la descompactación. Los tratamientos descompactados disminuyeron significativamente la resistencia de los suelos, la cual fue 37 % menor que el testigo en la capa 0-25 cm y 24 % menor en los primeros 0-40 cm.

Braim et al. (1984) determinaron que el paraplow fue tan efectivo como el arado de rejas en reducir la RP hasta 35 cm de profundidad, cuyos valores de RP alcanzados donde se pasó el paraplow, fueron de 300 kPa contra 1200 kPa del testigo donde el suelo quedó sin disturbar. Muchas otras investigaciones nacionales e internacionales como éstas indican reducciones en la RP de los suelos como efecto del paraplow (Barbosa et al. 1989, Evans et al. 1996, Varsa et al. 1997, Martino 1998, Sadras et al. 2005, Busccher et al. 2006, Cholaky et al. 2006, Botta et al. 2010, Tours et al. 2014, Vallejos et al. 2014, Ernst y Rivoir 2016, Mozzaquatro y Raffo 2016, Etchegoimberry et al. 2017, Ferreira y Rostán 2017).

Según Hodgson et al., citados por Martino (2001), otra manera de demostrar estos efectos es a través de la profundidad a la que se alcanza cierto umbral de RP, quienes determinaron que el paraplow incrementó la máxima profundidad de enraizamiento, medida como la profundidad a la cual la RP alcanzaba un valor de 2000 kPa, la cual pasó de 23 a 32 cm. Los estudios indican que el mayor efecto que produce el paraplow en las propiedades físicas del suelo, se da generalmente entre los primeros 15 y 40 cm de profundidad (Braim et al. 1984, Martino 1998). En concordancia con esto, Sadras et al. (2005) observaron que en los primeros 10 cm de profundidad del perfil del suelo no se vieron diferencias significativas entre los tratamientos.

Conductividad hidráulica y capacidad de almacenaje de agua disponible

Cholaky et al. (2006) demostraron que la infiltración del agua es otra de las propiedades que puede mejorar con el uso de paraplow. Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001) explican esta mejora, como un efecto del incremento de la macroporosidad y la continuidad del sistema poroso, que permiten un ingreso más rápido del agua de lluvia al suelo, reduciendo las pérdidas por escurrimiento superficial, como así también el riesgo de erosión hídrica del suelo. Martino (1998) corroboró este efecto, midiendo la cantidad de agua total en los 45 cm superficiales del suelo dos días después de una lluvia de 90 mm. Los valores obtenidos fueron de 123 y 142 mm para los tratamientos testigo y subsolado respectivamente, aumento atribuido principalmente al incremento de la captura del agua por la mayor infiltración del suelo.

Otro efecto del paraplow que minimiza las pérdidas improductivas del agua, es el incremento de la capacidad de almacenaje de agua disponible del suelo (Barbosa et al. 1989, Pikul et al., citados por Martino 2001, Motavalli et al. 2003). Sadras et al. (2005) encontraron que este efecto se debe a la reducción del límite inferior de agua disponible (punto de marchitez permanente), principalmente en la zona de mayor reducción de la RP descrita por este autor (10-35 cm de profundidad). Mientras que el límite superior de la capacidad de retención del agua en el suelo (capacidad de campo), no fue afectado por los tratamientos. Esta mayor capacidad de retención generó reducciones importantes en la frecuencia y tasa de drenaje más allá de la zona de raíces del cultivo.

En conclusión, no solo se produce un incremento de la captura de agua por aumento de la tasa de infiltración, sino que además aumenta la capacidad de retener agua del suelo, lo que reduce las pérdidas improductivas y permite aumentar la eficiencia del uso del agua (Sadras et al., 2005).

2.5.1.3. Efecto del paraplow sobre la disponibilidad de nutrientes

Se han comprobado aumentos en la absorción de nutrientes, por determinadas especies, como efecto de la acción del paraplow. Braim et al. (1984) detectaron cierta tendencia a una mayor absorción de N por plantas de cebada en parcelas subsoladas, que en aquellas que no habían sido disturbadas, pero la respuesta global no fue significativa. Por otro lado, Motavalli et al. (2003) sí encontraron respuesta significativa en la absorción de N por los cultivos, siendo mayor la absorción en los tratamientos descompactados. Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001) quienes también comprobaron este efecto, lo asocian a una mayor mineralización de la materia orgánica producto de la mejora de la aireación del suelo y la infiltración de agua en el mismo. Efectivamente, Díaz Zorita (2000) en una investigación sobre siembra directa en la Pampa Semiárida, encontró incrementos en la disponibilidad de nitrógeno, observada a partir de los niveles de $\text{NO}_3\text{-N}$ en suelo, dado por la promoción de la mineralización

como resultado de la descompactación, lo cual se asoció a una reducción del 20 % de la cobertura del suelo por residuos.

También se ha demostrado un incremento en la absorción de P y K como efecto del paraplow, lo cual se atribuyó a una mayor exploración del suelo por las raíces (Ide et al., citados por Martino, 2001). Por otro lado, Barbosa et al. (1989) en un estudio de los efectos del paraplow sobre el cultivo de soja (*Glycine max* L.), indicaron una mayor disponibilidad de Ca, Mg y K en el tratamiento de laboreo profundo, como consecuencia de un mayor acceso de las raíces sobre los nutrientes del subsuelo. Esto se caracterizó como una de las causas del aumento del crecimiento y rendimiento, encontradas en los tratamientos con labranza profunda.

2.5.1.4. Efecto del paraplow sobre los cultivos

Implantación

En Uruguay, Martino (1998) encontró un marcado aumento de la población de plantas de maíz (56 %), cebada (22 %) y trigo (14 %) como consecuencia del uso del paraplow. Estos incrementos se asociaron principalmente a la mayor temperatura y a un mejor drenaje del suelo, como así también en algunos casos puede haber influido el mejor contacto semilla suelo. Ernst y Bentacur (2004) también detectaron un aumento en la implantación de maíz como efecto de la descompactación sub-superficial del suelo, lo cual se tradujo en un incremento significativo de la producción de grano. Resultados similares fueron obtenidos también en Uruguay en la tesis de grado de Ferreira y Rostán (2017), donde el cultivo de soja sobre el que se estudió tuvo un mayor rendimiento, explicado principalmente por un aumento en el número de plantas por metro cuadrado, como resultado del efecto directo de la descompactación mecánica con paraplow.

Crecimiento de la raíz y de la parte aérea

Diversos estudios sobre el efecto del paraplow en sistemas de siembra directa, concluyen que la reducción de la resistencia a la penetración del suelo, la mayor infiltración de agua, el mayor flujo de oxígeno en el subsuelo y la mayor disponibilidad de nutrientes y humedad, permiten que las raíces de los cultivos crezcan más rápido y profundo, logrando así una mayor exploración del suelo, como así también mayor proliferación de raíces en cada horizonte (Braum et al. 1984, Martino 1998, Díaz Zorita 2000). Barbosa et al. (1989) también encontraron un enraizamiento más profundo (0,31 – 0,33 m) en tratamientos con labranza profunda, a diferencia de labranza convencional (0,24 m) dado una menor resistencia a la penetración y menor densidad aparente del suelo.

Botta et al. (2010) en un estudio realizado en soja (*Glycine max* L.), hallaron además valores más altos de materia seca de la raíz en R4 en las parcelas que fueron

subsoladas, lo cual se relacionó directamente con el rendimiento alcanzado. Busccher et al. (2006) afirman que la mayor exploración radicular producto de la labranza profunda puede aliviar un estrés hídrico, dado que las plantas pueden absorber agua a mayor profundidad. Varsa et al. (1997) asimismo concluyen que la mejora en las condiciones del suelo para el crecimiento de raíces aumentó la capacidad de los cultivos para producir grano.

Por otro lado, el crecimiento de la parte vegetativa aérea de la planta no se ha estudiado en tanta abundancia como en el crecimiento radicular. Pero se han observado efectos positivos aunque no siempre significativos (Evans et al., 1996). Mozzaquatro y Raffo (2016) encontraron que el pasaje previo del paraplow generó diferencias positivas en la altura de planta de soja (*Glycine max* L.), solamente en las zonas de mayor RP. En este caso se vio afectado el tamaño de las plantas dado que la elongación de los entrenudos fue menor en el tratamiento sin descompactar. Este efecto también fue descrito por Ernst y Rivoir (2016), Ferreira y Rostán (2017), como resultado de la disminución de la RP del suelo.

Rendimiento y sus componentes

Como ya se mencionó, la ruptura de la capa compactada promueve un enraizamiento más rápido y profundo, lo que aumenta la accesibilidad al agua y nutrientes (Barbosa et al. 1989, Álvarez et al. 2009), mientras que a su vez la disponibilidad de estos recursos puede llegar a aumentar (Díaz Zorita 2000, Sadras et al. 2005). Estos son los principales efectos del paraplow, que interaccionan con el posible incremento del rendimiento producto de dicha práctica (Martino, 2001). Sin embargo, Sadras et al. (2005) concluyen que los efectos de paraplow en el rendimiento están ligados principalmente al aumento de la disponibilidad de agua.

Son varios los estudios que confirman los beneficios de la descompactación sub-superficial con el uso del paraplow en los rendimientos de ciertos cultivos, para distintos tipos de suelo, en distintas partes del mundo. Estos incrementos fueron variables entre las investigaciones internacionales, siendo algunos ejemplos: trigo (*Triticum aestivum* L.) 0-43 % (Sadras et al., 2005), cebada (*Hordeum vulgare* L.) 12 % (Baird et al., 1984), maíz (*Zea mays* L.) 3-9 % (Reeder et al., citados por Botta et al. 2006a, Álvarez et al. 2009), y 2,0 – 3,5 Mg ha⁻¹ también para maíz (Motavalli et al., 2003), soja (*Glycine max* L.) 1,5-3 % (Reeder et al., citados por Botta et al., 2006a), y en otro estudio sobre soja 21-24 % (Barbosa et al., 1989).

En Uruguay, las respuestas en el rendimiento de los cultivos al uso del paraplow han sido en general mayores a las mencionadas, observándose aumentos en la mayoría de los experimentos realizados. A modo de resumen se presenta el cuadro No. 1.

Cuadro No. 1. Resumen de las investigaciones nacionales sobre el efecto de la descompactación sub-superficial en el rendimiento de cultivos.

Autor/es	Año	Cultivo	Respuesta promedio
Martino	1998	Maíz	102 %
		Girasol	36 %
		Cebada	29 %
		Trigo	14 %
Ernst y Bentancour	2004	Maíz	24 % (1177 kg ha ⁻¹)
Ernst y Rivoir	2016	Soja	Sin respuesta en el rendimiento
Mozzaquatro y Raffo	2016	Soja	7 - 94 % (241 - 1497 kg ha ⁻¹) *
Etchegoimberry et al.	2017	Soja	11 % (253 kg ha ⁻¹)
Ferreira y Rostán	2017	Soja	8 % (190 kg ha ⁻¹)

*Respuesta variable de acuerdo al grado de compactación original.

Parte del aumento registrado en soja por Echegoimberry et al. (2017), se relacionó con una mejora de la condición física del suelo, dado la reducción de la resistencia a la penetración producto del pasaje del paraplow. Mozzaquatro y Raffo (2016) como así también Ferreira y Rostán (2017) asumen que los incrementos de rendimiento de soja podrían también estar explicados por diferencias en implantación entre los tratamientos. Ernst y Bentacour (2004) en su trabajo sobre maíz, asocian también el incremento en la población lograda con el incremento del número de grano por unidad de superficie, y con ello el aumento del rendimiento. Por otro lado, Martino (1998) identificó para cada cultivo, distintas variables que expliquen los incrementos de rendimiento, las cuales fueron: mejora en la implantación para maíz, cebada y trigo, aumento de la proliferación de raíces (dado el incremento de la aireación y la reducción de la RP) en los cuatro cultivos evaluados (maíz, girasol, cebada y trigo), mejor control de malezas en maíz, y un mayor número de granos por unidad de superficie tanto en trigo como cebada, dado un menor número de aborto floral.

Aun así, Martino (1998) afirma que el subsolado del suelo no resultó siempre en una mejora del rendimiento, ya que no se registró respuesta a la descompactación sub-superficial en 3 de los 14 experimentos que integraron este trabajo. Así mismo Echegoimberry et al. (2017) encontraron respuesta en 2 de 3 zonas diferenciadas a partir de la varianza espacial y temporal del rendimiento de soja. Caso similar se registró en el trabajo de Mozzaquatro y Raffo (2016), donde sólo hubo respuesta del rendimiento al subsolado en las zonas de mayor compactación original. Mientras que en el trabajo de Ernst y Rivoir (2016) no se produjo ninguna diferencia en el rendimiento dado el efecto del pasaje previo del paraplow.

En el mismo sentido, Evans et al. (1996) afirman que el subsolado del suelo no necesariamente incrementa los rendimientos, particularmente si la compactación no es

evidente. De acuerdo a esto Martino (2001), Gutiérrez et al. (2014), señalan la necesidad de identificar zonas donde la compactación sea realmente una limitante para minimizar costos e incrementar la eficiencia de la labor.

A su vez, los incrementos del rendimiento tienden a ser muy variable, dado que la magnitud del efecto sobre los cultivos dependerá en gran medida del tipo de suelo y las condiciones climáticas (Díaz Zorita, 2000). De acuerdo a esto, Vallejos et al. (2014) afirman que la respuesta del cultivo de soja al subsolado parecería ser errática, dependiendo de la situación climática y la historia del lote. En términos generales la respuesta tiende a ser mayor en condiciones de estrés hídrico moderado, y mínima o nula en condiciones de estrés hídrico severo o de alta humedad (Sadras et al., 2005). Varsa et al. (1997) concluyen además, que en años con adecuadas precipitaciones se minimizan los beneficios derivados del laboreo profundo.

2.5.1.5. Efecto residual del paraplow

El efecto provocado por la descompactación mecánica del suelo, en sus propiedades físicas y en los cultivos, tiene una determinada duración, la cual depende principalmente de cuán degradado esté el suelo con el que se inicia (Dexter, citado por Martino, 2001).

Álvarez et al. (2009) afirman que la re-compactación y sedimentación puede generarse debido a la mayor vulnerabilidad mecánica en que queda un suelo descompactado frente al tránsito de maquinarias, o debido a los efectos de la consolidación natural. Duval et al., Johnson et al., citados por Evans et al. (1996), realizaron ensayos de subsolados en el norte del cinturón maicero de los Estados Unidos de América, y observaron que las mejoras en las propiedades del suelo producidas por el subsolado fueron rápidamente negadas por el tráfico de ruedas subsiguiente. Braim et al. (1984) observaron que la RP hasta 35 cm de profundidad, si bien se redujo considerablemente por efecto del paraplow, aumentó 6 meses después de pasado éste (pasando de 300 a 600 kPa), mientras que el testigo sin paraplow se mantuvo constante (1200 a 1100 kPa). Botta et al. (2010), indican una residualidad de dos años post subsolado, al igual que en el estudio de Botta et al. (2006a) donde el incremento de la resistencia a la penetración se da en gran parte durante el primer cultivo y entre los 30 y 60 cm de profundidad. Datos similares fueron observados en los ensayos de Martino (1998), donde 25 meses fueron necesarios para que las propiedades físicas del suelo volviesen al estado inicial luego de haber pasado el paraplow. Ferreira y Rostán (2017) afirman también que el efecto positivo sobre las propiedades físicas del suelo, más específicamente la resistencia a la penetración, duraron al menos un año, sin embargo, estos mismos autores no encontraron diferencias en el rendimiento como efecto de esa residualidad en las propiedades físicas.

En el estudio de Martino (1998), los efectos en la productividad de los cultivos tuvieron similar residualidad que en las propiedades físicas del suelo, donde una pasada de paraplow aumentó la productividad global de los tres cultivos subsiguientes entre 25 y 53 %, con respecto al suelo sin subsolar. Los incrementos generados por el subsolado practicado previo a cada cultivo comparado con una pasada cada tres cultivos, fueron muy reducidos como para igualar el costo energético extra. Sadras et al. (2005) observaron que la respuesta de rendimiento al subsolado permaneció por lo menos durante dos temporadas de cultivo, mientras que Álvarez et al. (2009) no detectaron efectos residuales de la descompactación sobre los rendimientos de los cultivos de soja (tanto en cultivos de primera como de segunda), año después de haber subsolado.

Por último Dexter, citado por Martino (2001) concluye que la mejora en la estructura lograda a través del laboreo es en general transitoria, particularmente en suelos degradados, con bajo contenido de materia orgánica y pobre estabilidad de agregados. Por ende la labranza por sí sola no puede remediar estados de degradación estructural severos, ya que ésta solo afecta directamente la macro-estructura del suelo. Sin embargo, la labranza puede ser el primer paso en la mejora del suelo, dado que proporciona espacios de poros llenos de aire en éste, donde puede desarrollarse la actividad biológica (Dexter, 1988).

2.5.2. Laboreo biológico

García Préchac et al. (2004) afirman la existencia de cierta adopción cultural hacia el laboreo, como única manera de resolver la problemática producto de la compactación del suelo en los sistemas de agricultura continua bajo siembra directa. Sin embargo, la información científica indica que no cualquier labranza es eficiente, ya que esta práctica es una de las principales causas de la compactación del suelo como se expresó anteriormente (DeJong-Hughes et al. 2001, García Préchac et al. 2004). Además, aún se discute sobre la durabilidad del efecto y la conveniencia económica de esta práctica (Gutiérrez et al., 2014).

Otra alternativa para remediar la compactación del suelo, sin dejar de lado la siembra directa, es la selección de rotaciones que incluyan cultivos con plantas de raíces profundas capaces de desarrollar sus raíces en suelos con altos niveles de compactación (Martino 2001, Motavalli et al. 2003, Sawchik 2007). Al morir y descomponerse estas raíces, se forman bio-canales en el suelo, los cuales proporcionan espacio para el enraizamiento profundo de los cultivos siguientes (Dexter, 1991).

Efectivamente, la estructura del suelo puede ser reconstruida por la acción de agentes naturales a lo largo de los años y de esta forma mejorar la capacidad de infiltración de agua, el intercambio de gases entre suelo y atmósfera, y la penetrabilidad de las raíces (Martino, 2001).

Chan y Heenan, citados por Ponce de León et al. (1999), evaluaron los efectos de dos rotaciones sobre determinadas propiedades físicas del suelo. Los ensayos estaban basados en secuencias de cuatro cultivos sucesivos, una exclusivamente de trigo y la otra de trigo alternado con canola. Como resultado, encontraron que el suelo que tuvo canola tenía mejor estructura, mayor macroporosidad y ofrecía menor resistencia a la penetración que aquel suelo que solo había tenido trigo durante ese período. Estas diferencias se mantuvieron hasta una profundidad de 0,18 m. Según Restovich et al., citados por Tours et al. (2014), otra de las alternativas planteadas para contrarrestar los efectos de la compactación sería la intensificación de la agricultura introduciendo cultivos de cobertura en la rotación, cuando en éstas existen largos períodos de barbecho. La introducción de cultivos de cobertura invernales en la secuencia puede provocar disminuciones en la densidad aparente del suelo y aumentar considerablemente la porosidad total gracias a la exploración radicular (Villamil et al., citados por Tours et al., 2014). Resultados similares fueron obtenidos por Calonego y Rosolem (2010), quienes además afirman haber mejorado los rendimientos de soja en aquellos sitios donde se incluían en la rotación cultivos de cobertura con sistemas radiculares agresivos y vigorosos, como consecuencia del incremento de macroporos en el perfil del suelo, lo que mejoró la infiltración de agua y el crecimiento de la raíz de soja en profundidad.

Estas alternativas, permitirían ampliar el menú de especies que puedan revertir procesos de degradación en los sistemas de agricultura continua bajo siembra directa y cumplir en cierta medida el rol de las pasturas (Sawchik, 2007). Conocerlas es de importancia dado que existen diferencias notorias entre especies, en su capacidad de penetrar a través de las capas compactadas del suelo (Singh y Sainju, citados por Hamza y Anderson, 2005).

Aun así, la eficacia de este método, también depende del estado inicial de compactación del suelo, ya que incluso las especies indicadas para esta finalidad tienen limitado el desarrollo de sus raíces cuando el suelo presenta niveles muy altos de densidad aparente y resistencia a la penetración (Ponce de León et al. 1999, Cubilla et al. 2002). En relación a esto, Martino (2001) señala que aún se tiene que comprobar si es posible lograr altas productividades en suelos altamente compactados, ya que es necesario para alcanzar un buen efecto sobre las propiedades físicas del suelo. Por lo cual considera que esta alternativa es motivo de reflexión para investigaciones futuras.

2.6. HIPÓTESIS

Este estudio planteó las hipótesis de que: (a) utilizando la resistencia a la penetración como indicador de la compactación del suelo, es posible identificar situaciones en las que la compactación actúa como factor limitante del rendimiento, (b) la labranza sub-superficial resulta una alternativa válida para levantar la restricción lo cual resulta en un incremento del rendimiento de los cultivos y (c) existe efecto residual de la descompactación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL EXPERIMENTAL

El experimento se instaló en el departamento de Soriano, Uruguay, en una chacra perteneciente al establecimiento “El Mangrullo” (33°27'12.50"S, 57°73'70.43"O, 85 metros de elevación).

El material geológico en el sitio experimental corresponde a la formación Fray Bentos, con relieve suavemente ondulado de pendientes inferiores a 6 %. Los suelos corresponden a la Unidad Bequeló según la carta de reconocimientos de suelo de Colonia y Soriano 1:200.000 (MAP, 1967), y con el grupo de suelos CONEAT 11.5, índice de productividad 228 (MGAP. PRENADER, 2010). Dominan los Brunosoles Éutricos, Típicos y Hápticos, suelos de alta aptitud para cultivos de verano, profundos, de texturas medias y pesadas, y de alta fertilidad natural (MGAP. DSA. DIRENARE, 2006).

El ensayo se realizó en un potrero, cuyos últimos 9 años fueron de agricultura continua en siembra directa (sin laboreo), situación propicia para poder identificar zonas con respuesta diferencial a la descompactación.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Para dar respuesta a los objetivos planteados se evaluó el efecto de dos tratamientos denominados “siembra directa” (SD) y “descompactado sub-superficial” (D), aplicados en fajas apareadas con tres repeticiones. Ambos tratamientos se aplicaron en diseños de bloques completos al azar, iniciados en dos años sucesivos, otoño del 2015 (SD1 y D1) y del 2016 (D2 y SD2). El efecto se cuantificó en el cultivo de soja sembrado en la zafra 2016/2017, por lo que la respuesta cuantificada sobre los tratamientos aplicados en el 2016 y 2015 representan el efecto directo y residual de la descompactación respectivamente.

Las fajas apareadas fueron de 17 y 13 m de ancho (diseño 2015 y 2016 respectivamente), por un largo variable que oscila entre 120 y 265 m, las cuales fueron orientadas de manera de contemplar la mayor variabilidad del suelo y topografía. Dentro de éstas se definió una grilla de muestreo geo-referenciada de entre 7 y 12 puntos distribuidos de forma uniforme en el espacio, los cuales son tomados como referencia para todas las determinaciones realizadas en el suelo y en el cultivo (unidades de muestreo, figura No. 1). El área total del ensayo fue de 4,13 hectáreas.

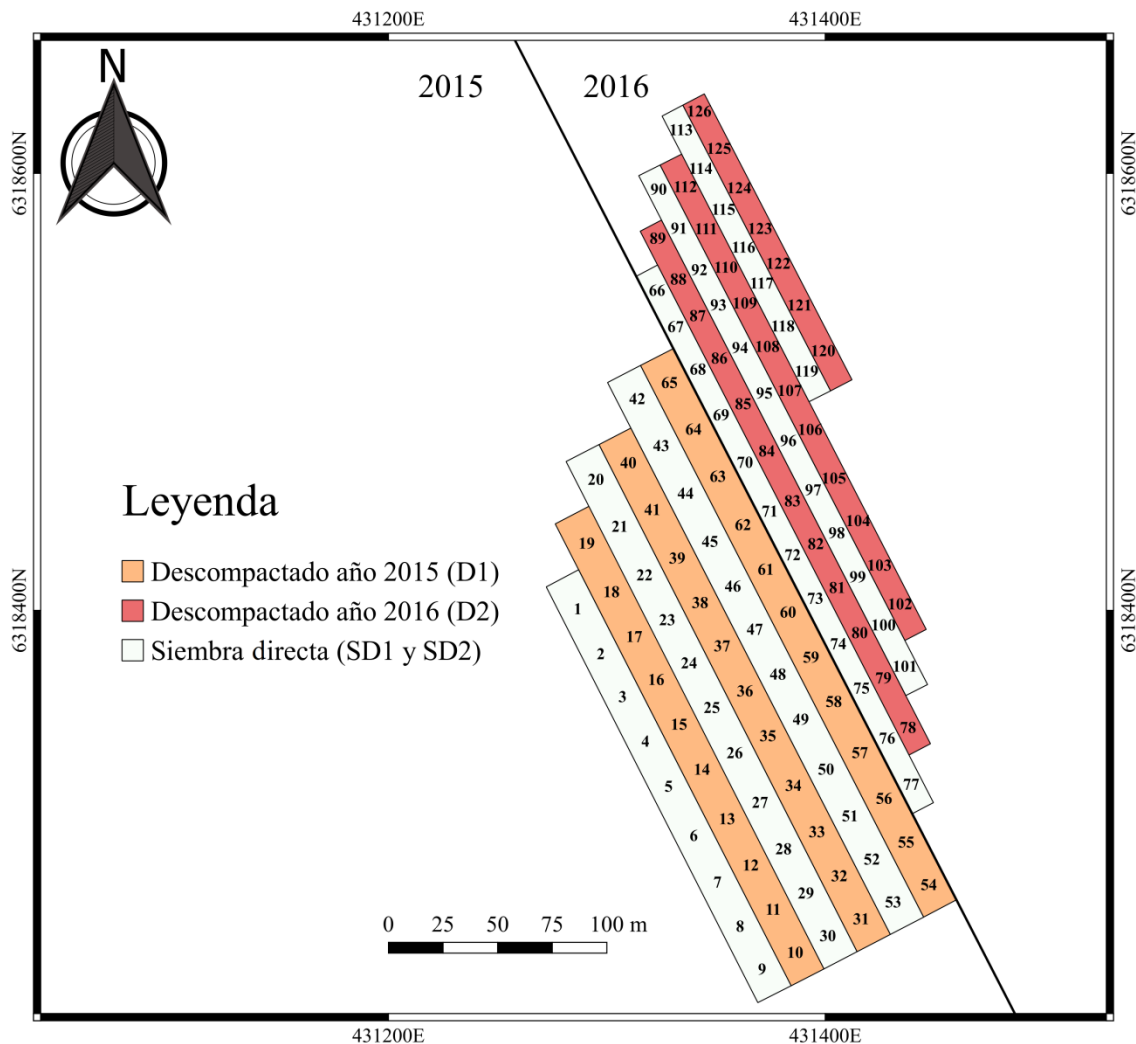


Figura No. 1. Croquis del experimento.

Para esto se utilizó un paraplow de arrastre provisto de 8 timones, distanciados a 52 cm, con disco de cortes delanteros y rolos posteriores para el sellado del suelo. Esta herramienta fue pasada a una profundidad máxima de 30-40 cm, abarcando un ancho operativo de 4,16 m, por lo cual cada parcela de los tratamientos D1 y D2, tiene 4 y 3 pasadas respectivamente.

En las parcelas del tratamiento D1, se pasó el paraplow en mayo del año 2015, cuando las condiciones de humedad del subsuelo para la fractura del suelo eran propicias. Lo mismo para las parcelas del tratamiento D2, donde la labor fue realizada en junio del año 2016.

3.3. MANEJO DEL CULTIVO

La información corresponde a un cultivo de soja de segunda, sembrado el 8 de diciembre del 2016, cuyo antecesor de invierno fue un cultivo de cebada (rendimiento promedio de chacra: 4061 kg ha⁻¹).

Cuadro No. 2. Manejo del cultivo – soja 2016/2017.

Fecha	Manejo	Detalle
8/12/2016	Análisis de suelo	Nitrato: 8,0 ppm
		P Bray: 10,0 ppm
		K int.: 0,67 meq
8/12/2016	Inicio del barbecho – herbicidas	Glifosato (2 l ha ⁻¹)
		Spider (30 g ha ⁻¹)
8/12/2016	Fertilización	150 kg.ha ⁻¹ (0-18/20-0+12S)
8/12/2016	Siembra	Variedad: GE590
		Densidad: 70 kg ha ⁻¹
		Población: 18 plantas m ⁻¹
		Distancia entre hileras: 38 cm
3/05/2017	Cosecha	Rendimiento de chacra: 3324 kg ha ⁻¹

El resto de las labores y decisiones de manejo del cultivo fueron realizadas por el productor responsable de la chacra.

3.4. DETERMINACIONES

3.4.1. Propiedades edáficas

El 27 de diciembre, se midió la resistencia a la penetración del suelo utilizando un penetrógrafo digital Rimik CP20 (penetrógrafo de cono, velocidad máxima 2 m min⁻¹, punta de cono circular de 35° y sección transversal de 1,33 cm²). Para ésta, se procuró que sea a velocidad constante y en condiciones próximas a capacidad de campo, dado que en suelos húmedos los rangos de variación de RP son bajos, mientras que en suelos secos la variabilidad es muy elevada y a su vez los valores tienden a ser mayores, dado el incremento de la cohesión de los agregados del suelo (Cerana, citado por Cazorla y Masiero, 2006). Dado esto, la medición se realizó luego de una lluvia intensa de 78 mm, habiendo llovido en total 118 mm en los últimos 20 días. Aun así, es probable que el suelo no haya estado a capacidad de campo debido al bajo aporte de agua en la primer y segunda década del mes de diciembre, al alto consumo de agua por parte del cultivo y al momento del año en el que se hizo la medición. Los valores de RP fueron registrados en intervalos verticales de 2 cm hasta alcanzar una profundidad de 40 cm, realizándose también una repetición en cada punto para minimizar el error de muestreo. Por último se calcularon valores promedio para los intervalos de 0 a 8 cm, 8 a 20 cm y 20 a 40 cm de

profundidad, subdividiendo el perfil del suelo para analizar los resultados en cada estrato.

3.4.2. Respuesta del cultivo

El día 7 de marzo, con la soja en estadio R5.3 de la escala de Fehr y Caviness (1977), se cuantificó la población lograda en cada unidad de muestreo en 10 metros lineales de surco. Además se midió el estado fenológico del cultivo, la altura de planta al último nudo y el número de nudos por planta, en 10 plantas tomadas al azar en cada unidad de muestreo.

También se recolectaron 20 folíolos expandidos por sitio, conformando una muestra compuesta. Éstas se secaron en estufa a 60 °C durante 72 hs. Finalmente fueron molidas para analizar la concentración de potasio (K) y magnesio (Mg) en ellas.

El rendimiento en grano se determinó utilizando una cosechadora MF equipada con monitor de rendimiento geo-referenciado, el cual registró en promedio, un dato cada 0,51 m de avance. Con estos datos, se midió el rendimiento cada 260 m² a lo largo de cada faja, correspondiente a cada unidad de muestreo, con el fin de cuantificar la variabilidad de la respuesta entre los tratamientos.

Por último, se estimaron temporalmente las etapas fenológicas del cultivo en estudio, con el uso del modelo de predicción de estados fenológicos de soja de Fassio et al. (2014), disponible en el sitio web de la Unidad de Agroclima y Sistemas de Información de INIA.

3.4.3. Datos climáticos

Para el período octubre 2016 – mayo 2017, se recogieron los datos pluviométricos mensuales de la región de mercedes y alrededores, y también la media histórica mensual de los años 1980-2009 para estos meses. Esto se obtuvo de la información brindada por la Unidad de Agroclima y Sistemas de Información de INIA. Por otro lado, se obtuvo también la información pluviométrica diaria de ese período, recolectada de la información brindada por Tutiempo Network, S.L., la cual coincidió en muy buena medida con los datos mensuales provenientes de INIA. Con estos se construyó un régimen de precipitaciones decádico para el análisis posterior.

Por otro lado, se recolectaron los datos térmicos, los cuales también se obtuvieron de la información brindada por la Unidad de Agroclima y Sistemas de Información de INIA. Tanto para la media mensual de ese período como para la media promedio de esos meses en el período 1980-2009, se utilizaron los datos registrados por la estación meteorológica de INIA La Estanzuela, al ser ésta la más cercana al sitio experimental.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.5.1. Descripción estadística general

Se comenzó con una descripción estadística general, que resume las variables medidas mediante: la media, el desvío estándar, el coeficiente de variación y los percentiles 33 y 66. Esto se hizo con el programa InfoStat/E.

3.5.2. Análisis estadístico general

Contemplando el primer objetivo de este estudio (objetivo a: evaluar el efecto del subsolador tipo paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo, y sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de soja [*Glycine max* L.]) se analizó el efecto de los tratamientos sobre las variables medidas en el diseño experimental 2 (año 2016), para analizar el “efecto directo” del paraplow sobre éstas. Luego se hizo lo mismo con los datos del diseño experimental 1 (año 2015) “efecto residual”, atendiendo de esta manera el tercer objetivo de este trabajo (objetivo c: cuantificar la duración del efecto positivo de la descompactación sobre la resistencia a la penetración del suelo y sobre el cultivo).

Ambos se hicieron mediante un análisis de varianza clásico (ANAVA), considerando el test de LDS de Fisher, con un nivel de significancia de 0,05, utilizando el programa InfoStat/E. El análisis se realizó con tratamientos dentro del año de realizada la descompactación (efecto anidado). El error para este factor corresponde a la interacción con la repetición. Al igual que para los siguientes análisis, se consideraron todos los sitios de muestreo dentro de cada faja como error de muestro.

3.5.3. Análisis espacial – control local

De manera de cumplir el segundo objetivo (objetivo b: identificar zonas con respuesta diferencial a la descompactación cuantificando la respuesta en el cultivo), se analizó la correlación espacial de la RP tomando solamente los datos de los tratamientos SD para tres profundidades (0-8, 8-20 y 20-40 cm). Para ello se estudió el ajuste de semivariogramas de tipo estable, exponencial, potencial y gaussiano utilizando el software Arcgis 10. Se seleccionó de tipo exponencial, que resultó el de mejor relación umbral/pepita. Se construyó un mapa de RP de todo el experimento utilizando la información del estrato 8-20 cm, que fue con el que se obtuvo la mejor correlación espacial, definida también por la relación umbral/pepita. La interpolación se realizó mediante kriging ordinario, definiéndose 3 zonas homogéneas de compactación y con máxima diferencia entre ellas.

El criterio de clasificación de las zonas se definió procurando obtener suficientes repeticiones de los tratamientos dentro de cada una de ellas. Esta clasificación se hizo en tres rangos de predichos de la variable RP del estrato 8-20 cm: zona de RP baja

(< 1800 kPa), zona de RP media (1800-2300 kPa) y zona de RP alta (> 2300 kPa). Una vez hecha esta zonificación se prosiguió a realizar el análisis estadístico por zonas.

3.5.4. Análisis estadístico por zonas

En este análisis se evaluó el “efecto directo” y “efecto residual” de paraplow sobre las variables medidas, en cada zona preestablecida, eliminando así el efecto sitio. De esta forma se agrupan los tres objetivos del trabajo.

Para esto se usó también el programa InfoStat/E, en donde se construyó un ANAVA, utilizando el test de LDS de Fisher, con un nivel de significancia de 0,05, considerando también todos los sitios de muestreo dentro de cada faja como error de muestro. El análisis consideró el efecto tratamiento dentro de años dentro de zona.

3.5.5. Análisis de regresión lineal - rendimiento y resistencia a la penetración

Por último se realizó un análisis de la regresión lineal entre la RP del estrato 8-20 cm de profundidad, con el rendimiento del cultivo, de manera de profundizar con el análisis de los efectos del paraplow sobre el rendimiento.

4. RESULTADOS

4.1. CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

En la figura No. 2, se presenta la caracterización térmica y pluviométrica del período comprendido entre octubre del 2016 y mayo del 2017 en la región de Mercedes y alrededores, y se lo compara con las medias históricas mensuales del 1980 al 2009 para la misma región. La ilustración incluye además la ubicación temporal de las etapas fenológicas del cultivo en estudio, propuestas por Fehr y Caviness (1977) y estimadas por el modelo de predicción de estados fenológicos de soja de Fassio et al. (2014).

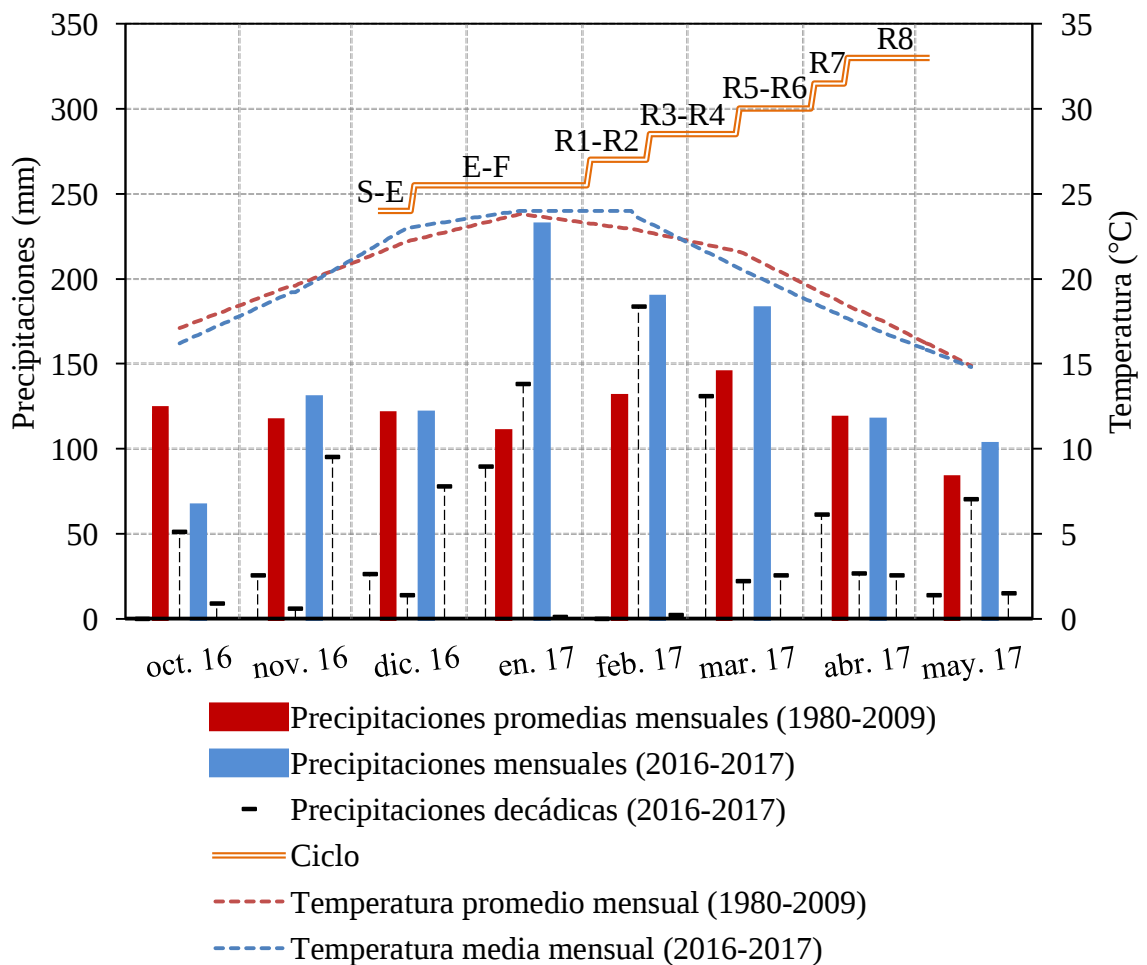


Figura No. 2. Temperatura y precipitaciones en el período octubre 2016 – mayo 2017, medias históricas térmicas e hídricas del período 1980 – 2009 para la zona de Mercedes y alrededores, y ubicación temporal de las etapas fenológicas del cultivo.

Durante el período de crecimiento del cultivo, las temperaturas medias mensuales fueron levemente superiores al promedio histórico en los meses de diciembre, enero y febrero, y más templadas en los restantes meses de la estación de crecimiento, principalmente en el período marzo-abril, cuya temperatura fue aproximadamente 1 °C inferior.

En cuanto al régimen hídrico, este período de tiempo se caracterizó por tener precipitaciones adecuadas para alcanzar altos rendimientos. Si bien el cultivo se implantó días después de la cosecha de un cultivo de invierno, el contenido de agua en el suelo a siembra fue aceptable, dado que 11 días previo a ésta ocurrió una lluvia intensa de 93 mm, y en ese período se dio una acumulación de 121 mm. Durante la etapa de S-E (siembra-emergencia), solo se registraron 5 mm de lluvias, siendo muy poco frecuentes las precipitaciones durante la segunda década de diciembre. A partir del 20 de diciembre, hasta el 16 de enero, se acumuló un total de 305 mm. En este período el cultivo estaba en la etapa E-F (emergencia-floración), la cual concluyó aproximadamente el 2 de febrero (± 5 días). Durante los meses de enero, febrero y marzo aumentó la intensidad de lluvias, superando el promedio histórico de precipitaciones acumuladas mensuales (114, 46 y 27 % superiores respectivamente), aun así, ocurrieron períodos de escasas precipitaciones (última década de enero, y primer y última década de febrero). El período más crítico del cultivo propuesto por Kantolic et al. (2003), período entre los estadios R4 y R6 de la escala de Fehr y Caviness (1977), se ubicó aproximadamente en el mes de marzo, tiempo en el cual se acumuló un total de 179 mm (1/3-10/3: 131 mm; 11/3-20/3: 22 mm; 21/3-31/3: 26 mm), lo que repercutió de forma positiva sobre el rendimiento en grano, teniendo en cuenta que las principales precipitaciones ocurrieron al comienzo de dicho período y considerando la importancia de disponer altos contenidos hídricos en el suelo durante esta etapa de crecimiento del cultivo (Giménez, 2010). Se puede concluir entonces que los requerimientos hídricos del cultivo, los cuales promedian entre 450-650 mm para la región (Giménez y García, 2011) y se hacen máximos en el período más crítico (Karam et al., 2005), fueron cubiertos en buena parte, dado el aporte proveniente de las precipitaciones, las cuales acumularon 749 mm durante el período siembra-R7.

4.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA GENERAL

Cuadro No. 3. Resumen de las variables medidas.

Variable	n	Media	DE	CV	P (33)	P (66)
Variables medidas en suelo						
RP 0-8 cm (kPa)	126	926	372	40	676	1070
RP 8-20 cm (kPa)	126	1903	582	31	1557	2060
RP 20-40 cm (kPa)	126	2087	460	22	1869	2283
Variables medidas en el cultivo						
Población (pl. m ⁻²)	125	31	5	17	28	33
Fenología	125	5,3	0,1	1,4	5,2	5,3
Altura de planta (cm)	125	83	7	8	80	85
No. nudos planta ⁻¹	125	15	1	9	14	15
% K en hoja	125	1,42	0,17	11,86	1,35	1,49
% Mg en hoja	125	0,23	0,04	16,11	0,22	0,24
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	117	3,71	0,40	10,67	3,62	3,79

n: número de observaciones; DE: desvío estándar; CV: coeficiente de variación; RP: resistencia a la penetración; K: potasio; Mg: magnesio.

La RP incrementó con la profundidad de muestreo del suelo, haciéndose máxima en el estrato profundo. A su vez se incrementó la homogeneidad, disminuyendo el CV conforme aumenta la profundidad. Esto muestra una menor variabilidad intra-chacra de la RP al aumentar la profundidad (20-40 cm) en comparación a la RP en la superficie (0-8 cm). Los valores máximos registrados en cada capa del perfil fueron: 1975, 3584 y 3203 kPa para los estratos de 0-8, 8-20 y 20-40 cm de profundidad respectivamente. Por tanto, no necesariamente el estrato de mayor compactación fue el de 20-40 cm sino que en algunos casos la RP fue máxima en el de 8-20 cm. Los valores promedios de los tres estratos se consideran elevados para el desarrollo normal de los cultivos (Ehlers et al., Vepraskas, Gupta y Allmaras, Boone et al., citados por Díaz Zorita 2000, Thereadgill, citado por Gutiérrez et al. 2014, Mozzaquatro y Raffo 2016). Es posible que estos valores hayan sido sobre-estimados dado la posible falta de humedad óptima en el suelo al momento de la medición.

Las determinaciones en planta en general presentaron menor variabilidad que las del suelo, siendo la altura de planta y el número de nudos por planta las variables más homogéneas. La población promedio lograda estuvo dentro del rango recomendado considerando la variedad (GE590), la cual pertenece al grupo de madurez medio, como así también las poblaciones del tercil inferior y superior (P33 y P66), al haber tenido éstas pequeñas variaciones con respecto a la media (Vega y Andrade 2000, Bustamante y Espínola 2015). La concentración de nutrientes en planta, estuvo levemente por debajo de los rangos de suficiencia en soja sugeridos para el estadio R2 (K: 1,5-2,5; Mg:

0,25-1,00 descriptos por Jones, Malavolta et al., Sabbe et al., citados por Correndo y García, 2012). Sin embargo, el estado fenológico de muestreo (R5) no coincidió exactamente con el de referencia (R2), por lo que no se puede concluir que hubo deficiencias en el cultivo.

El rendimiento en promedio fue de $3,71 \pm 0,4 \text{ Mg ha}^{-1}$, lo que representa un CV de solamente el 11 % incluyendo la variabilidad impuesta por los tratamientos.

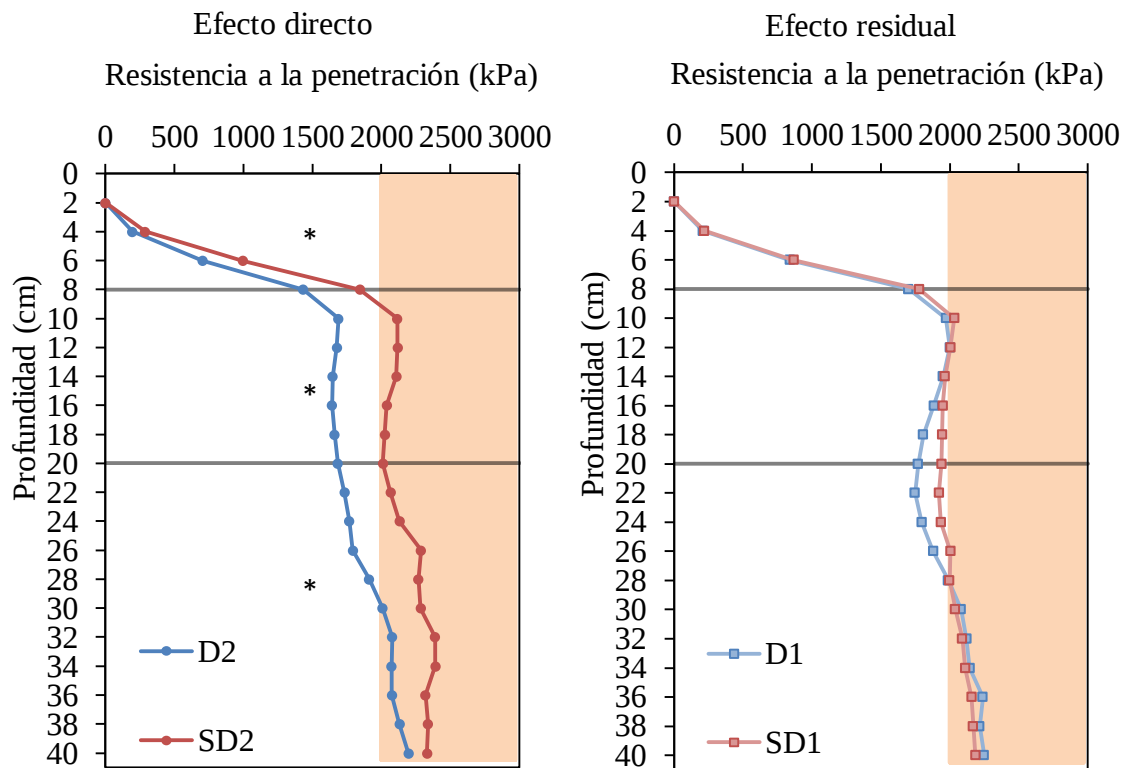
4.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO GENERAL

Cuadro No. 4. Análisis estadístico de los efectos directos y residuales del paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo y respuesta del cultivo de soja.

Variable	p-valor	Efecto directo		Efecto residual	
		Media		Media	
		SD2	D2	SD1	D1
Variables medidas en suelo					
RP 0-8 cm (kPa)	0,020	1031 ^b	772 ^a	950 ^{ab}	870 ^{ab}
RP 8-20 cm (kPa)	0,001	2082 ^c	1667 ^a	1930 ^{bc}	1866 ^b
RP 20-40 cm (kPa)	0,035	2291 ^b	1984 ^a	2005 ^a	2038 ^a
Variables medidas en el cultivo					
Población (pl. m ⁻²)	n.s.	32	30	29	31
Fenología	n.s.	5,2	5,2	5,3	5,3
Altura (cm)	0,001	85 ^a	82 ^{bc}	84 ^{ab}	80 ^c
No. nudos planta ⁻¹	0,001	14 ^c	14 ^{bc}	15 ^b	16 ^a
% K en hoja	0,063	1,48 ^a	1,48 ^a	1,30 ^c	1,40 ^b
% Mg en hoja	n.s.	0,22	0,22	0,25	0,25
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	n.s.	3,77	3,73	3,77	3,73

SD2: siembra directa, año 2016; D2: descompactado, año 2016; SD1: siembra directa, año 2015; D1: descompactado, año 2015; RP: resistencia a la penetración; K: potasio; Mg: magnesio; n.s.: no significativo ($P > 0,05$). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$). Las diferencias significativas descriptas son dentro de cada diseño (años).

Existieron diferencias estadísticas significativas en la RP, como efecto de la descompactación realizada el año en el que se sembró el cultivo de soja (2016) para los tres estratos evaluados ($P \leq 0,05$). En cambio en el análisis del “efecto residual” del paraplow sobre la RP no mostró estas diferencias, pudiéndose afirmar que en 19 meses se perdió el efecto del paraplow sobre esta propiedad física del suelo. En la figura No. 3, se muestra el perfil de resistencia a la penetración del suelo en intervalos de 2 cm, marcando el valor crítico de 2000 kPa.



*: Diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos por estrato ($P \leq 0,05$).

Figura No. 3. Efecto directo y residual del paraplow sobre la resistencia a la penetración (0-40 cm).

Las líneas horizontales dividen los tres estratos de profundidad: estrato superficial del suelo 0-8 cm, estrato medio 8-20 cm y estrato profundo 20-40 cm, profundidad hasta la cual midió el penetrógrafo. La zona de color beige representa la RP con la cual se limitarían los rendimientos por efecto de la compactación (Ehlers et al., Vepraskas, Gupta y Allmaras, Boone et al., citados por Díaz Zorita 2000, Thereadgill, citado por Gutiérrez et al. 2014), pero ante la posible sobre-estimación de los valores de RP medidos a campo, se asume que la relación de estos con el umbral definido es baja. Las diferencias significativas descritas son dentro de cada año de aplicación del tratamiento de descompactación.

Para el “efecto directo” del paraplow, la mayor diferencia de RP en términos porcentuales se registró en la primera capa (0-8 cm), donde el pasaje del paraplow redujo 25 % la RP, mientras que en los estratos de 8-20 y 20-40 cm se redujo 20 y 13 % respectivamente. En cambio, en valores absolutos la mayor diferencia se produjo en el estrato medio (8-20 cm), donde la reducción promedio fue de 414 kPa, seguido por el estrato más profundo (20-40 cm) con una reducción de 307 kPa. El estrato más

superficial fue poco afectado, alcanzando una reducción de 259 kPa. Esto se asemeja a los resultados obtenidos por Braim et al. (1984), Martino (1998), los cuales indicaron que el mayor efecto que produjo la labranza profunda en las propiedades físicas del suelo, se generó principalmente entre los primeros 15 y 40 cm de profundidad. Pero como ya se mencionó, también en el estrato superficial se encontraron diferencias significativas entre tratamientos, a diferencia de Sadras et al. (2005) quienes observaron que en los primeros 10 cm de profundidad del perfil del suelo el subsolado no generó diferencias significativas con el testigo sin descompactar.

Con respecto al análisis del “efecto residual” del laboreo profundo, si bien no se registraron diferencias significativas en la RP, entre los 18 y 26 cm de profundidad, se generó la máxima diferencia entre tratamientos, indicando posiblemente que ésta haya sido la capa que más demoró en volver al estado original luego del subsolado.

En cuanto a las variables medidas en el cultivo, la altura de planta y el número de nudos por planta, presentaron diferencias significativas ($P \leq 0,05$). A diferencia de Ernst y Rivoir (2016), Mozzaquatro y Raffo (2016), Ferreira y Rostán (2017), ocurrió una reducción en la altura de planta en respuesta al “efecto directo” y al “efecto residual” del uso del paraplow. Por otro lado, el número de nudos por plantas no difirió entre tratamientos al evaluar el “efecto directo”, por lo que el cambio de altura es resultado del acortamiento de la distancia entre nudos, una respuesta no esperada, ya que este comportamiento es típico de situaciones de alta RP del suelo. El “efecto residual” del número de nudos por planta sí fue significativo (D1-SD1). La misma respuesta existió para la concentración de K en hoja, variable que solamente fue afectada por el “efecto residual” de la descompactación ($P \leq 0,10$). Es posible que el cultivo haya tenido una emergencia más temprana, lo que se manifiesta en una tendencia a fenología más adelantada que permitió manifestar estos efectos como residual. Las demás variables de respuesta del cultivo no fueron afectadas significativamente por la descompactación sub-superficial del suelo.

El rendimiento en particular no respondió ni como “efecto directo” ni “efecto residual” ($P > 0,05$), por lo que se rechaza la segunda hipótesis planteada (hipótesis b: la labranza sub-superficial resulta una alternativa válida para levantar la restricción lo cual resulta en un incremento del rendimiento de los cultivos). La falta de respuesta residual en el rendimiento concuerda con los resultados del “efecto directo”.

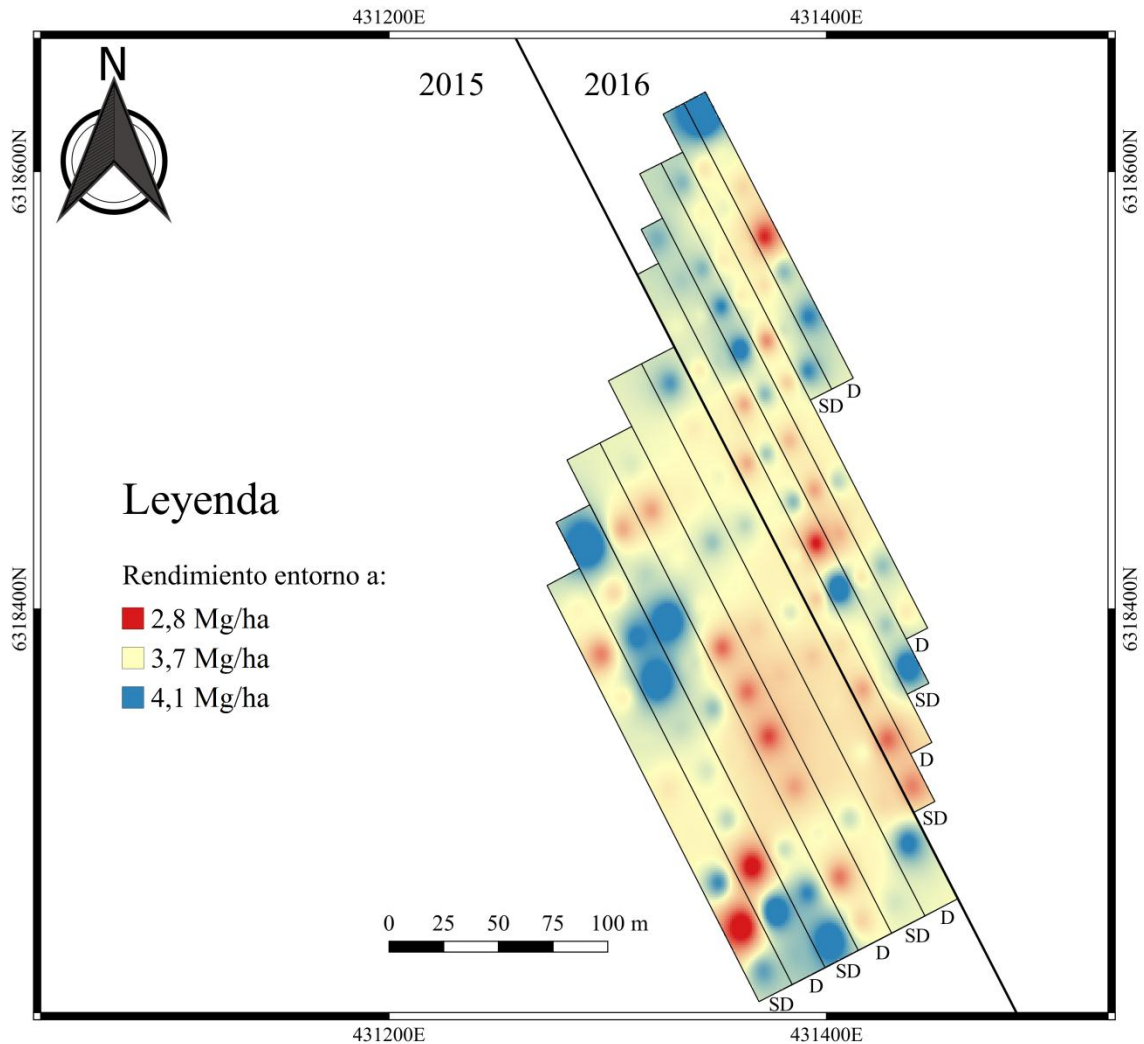


Figura No. 4. Mapa de calor del rendimiento.

La figura No. 4 muestra claramente lo mencionado anteriormente, pudiéndose observar que no existió en ninguno de los dos diseños, alguna tendencia de distribución de los rendimientos máximos y mínimos explicada por los tratamientos.

A modo de resumen, analizando la residualidad de los efectos del paraplow sobre el suelo y el cultivo, el cultivo respondió modificando la altura de planta, pero no se cuantificó respuesta sobre la RP. Esto último, sumando a la falta de respuesta en el rendimiento medio del área experimental, permite afirmar que luego de 19 meses se perdió el efecto del paraplow ($P \leq 0,05$), rechazando así la tercera hipótesis planteada (hipótesis c: existe efecto residual de la descompactación).

4.4. ANÁLISIS ESPACIAL – CONTROL LOCAL

La RP en el estrato entre 8-20 cm presentó la mayor correlación espacial, por lo cual se utilizó para generar “zonas homogéneas por compactación” y evaluar la respuesta a la descompactación dentro de ellas.

En la figura No. 5, se presenta la ubicación espacial de las zonas definidas en base a la RP en el estrato de 8-20 cm de profundidad.

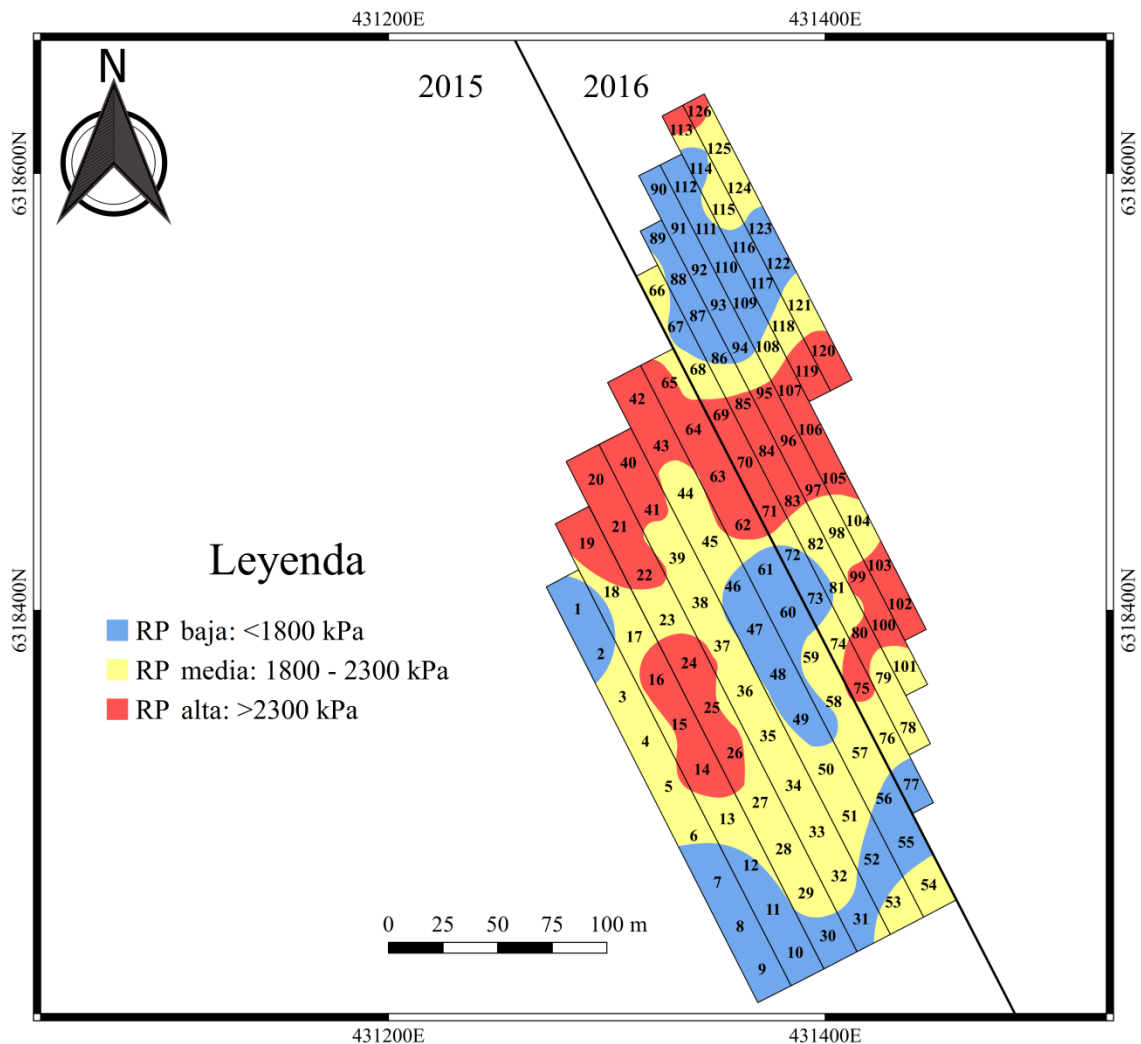


Figura No. 5. Zonificación de la resistencia a la penetración del estrato 8-20 cm.

La clasificación se hizo utilizando únicamente los registros de las fajas SD, generando tres rangos de valores predichos: zona de RP baja (< 1800 kPa), zona de RP media (1800-2300 kPa) y zonas de RP alta (> 2300 kPa).

Las zonas cruzan toda el área experimental, por lo que es posible ubicar los dos tratamientos en las tres zonas definidas en ambos diseños.

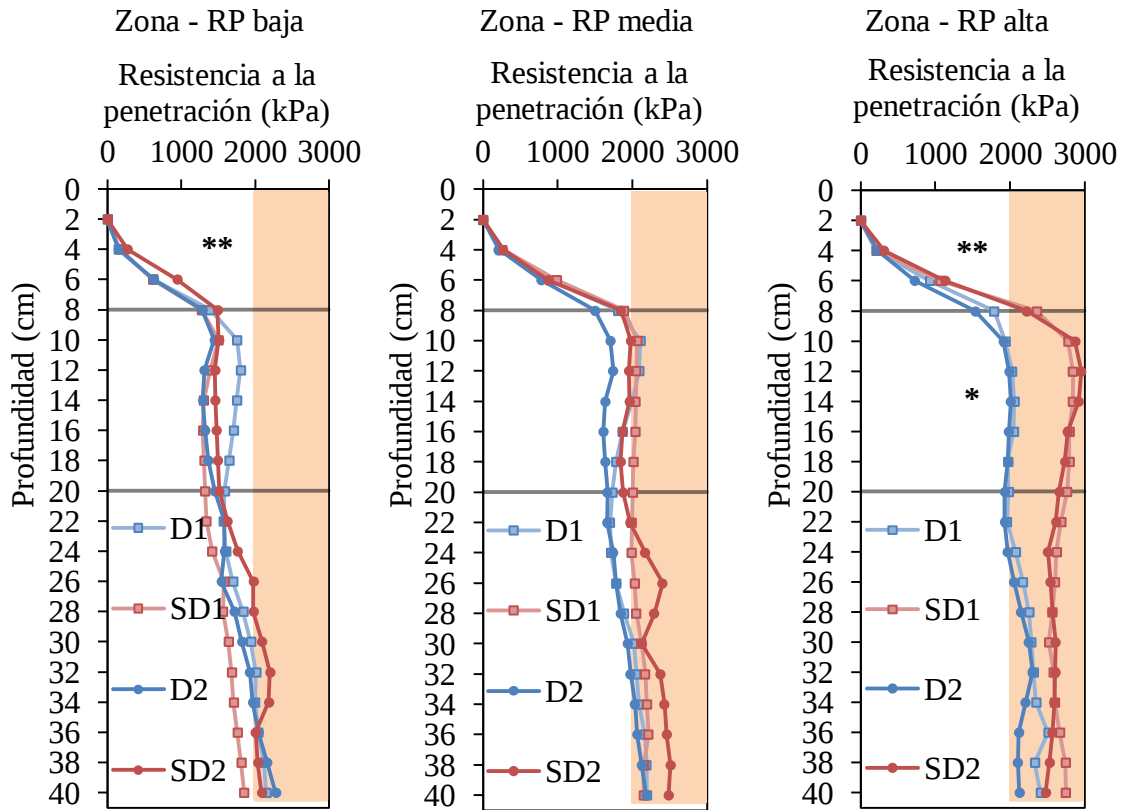
Cuadro No. 5. Datos del semivariograma en base a la resistencia a la penetración del estrato 8-20 cm.

Datos del semivariograma	
Número de datos utilizados	126
Rango (metros)	76,6
Umbral	0
Pepita	507324,97
Relación umbral/pepita	0 %

Dada la relación umbral/pepita de 0 %, se puede afirmar que existió una correlación espacial fuerte, según el criterio de clasificación realizado por Cambardella et al., citados por Pravia (2009). El rango o límite de la dependencia espacial fue de 76,6 m, por lo tanto, a partir de esta distancia se perdió la correlación espacial para un par de datos determinados (Moreno, 2009).

4.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO POR ZONAS

4.5.1. Respuesta en la resistencia a la penetración



** : Diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos por estrato ($P \leq 0,10$);
* : Diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos por estrato ($P \leq 0,05$).

Figura No. 6. Efecto directo y residual del paraplow sobre la resistencia a la penetración (0-40 cm) para las tres zonas.

En el análisis conjunto de los resultados, los tratamientos SD fueron iguales entre años dentro de cada zona. Esto permite afirmar que no hubo efecto sitio en el que se ubicó cada “año”, siendo únicamente diferente el efecto de los tratamientos D, de acuerdo a la zona en que se aplicaron (a excepción de la zona RP baja, donde los valores de SD1 fueron estadísticamente inferiores a los del SD2 en el estrato superficial, con $P \leq 0,10$).

Al agregar la interacción zona-tratamiento, sólo hubo diferencias estadísticamente significativas con $P \leq 0,05$, en el estrato 8-20 cm de profundidad de la zona RP alta, donde el paraplow redujo 30 % la RP (-851 kPa) como “efecto directo”.

En los otros dos estratos, no se puede afirmar que las diferencias encontradas se deban a los tratamientos ($P > 0,05$). Sin embargo, en el estrato 0-8 cm existió una tendencia ($P \leq 0,10$), al descenso de la RP como “efecto directo” de la labor, en las zonas RP baja y RP alta. Así mismo también se generó cierta tendencia a la reducción de la RP en el estrato profundo para las tres zonas.

Los resultados que existen en cuanto a la perdurabilidad de la descompactación en el tiempo son contradictorios (Álvarez et al., 2009). En este estudio, la estrategia experimental permitió identificar zonas con respuesta diferencial, dentro de un área en que, para el promedio, no hubo respuesta (figura No. 6). Los tratamientos D1 se diferenciaron estadísticamente del SD1 en cuanto a la RP en el estrato de 8-20 cm de profundidad para la zona RP alta, donde el efecto perduró al menos 19 meses post-subsolado, manteniendo una reducción del 25 % en comparación con el tratamiento sin subsolado (-695 kPa) ($D1 = D2 < SD1 = SD2$; $P \leq 0,05$). Además se mantuvo el efecto en el estrato superficial para la zona RP alta ($D1 = D2 < SD1 = SD2$; $P \leq 0,10$), como así también perduró la tendencia a la reducción de la RP en el estrato profundo por el pasaje del paraplow en las zonas RP media y RP alta.

Cabe mencionar que, para el “efecto residual”, durante el tiempo transcurrido entre el subsolado (mayo del 2015) y la medición de la RP, el suelo recibió el tránsito correspondiente a la siembra, pulverizaciones, cosecha y demás labores, principalmente para los cultivos de soja (zafra 2015/2016) y cebada (zafra 2016). Aun así, estos resultados permiten concluir que luego de 19 meses se mantuvo el efecto positivo del paraplow generado en la RP del suelo. Resultados similares fueron descriptos en el estudio realizado por Vallejos et al. (2014), quienes encontraron un efecto residual de al menos 18 meses, en la RP a la profundidad de 0 a 17,5 cm, como efecto del laboreo sub-superficial, donde la RP original en ese estrato del suelo (tratamiento testigo), fue alrededor de 1500 kPa.

En síntesis, se identificaron zonas con compactación diferencial dentro del potrero, con la posible presencia de un problema de compactación ubicado en la zona RP alta, en el estrato de 8-20 cm de profundidad, donde la RP en SD superó incluso los valores registrados en el estrato de 20-40 cm (relación contraria a lo que sucedió en las otras dos zonas, donde los mayores valores de RP de los tratamientos SD estuvieron en el estrato más profundo). La solución en el corto plazo podría estar en el subsolado del suelo, práctica que logró reducir la RP por debajo de los 2000 kPa, manteniendo este efecto por al menos 19 meses.

4.5.2. Respuesta del cultivo de soja

La única variable de respuesta que mostró deferencias significativas ($P \leq 0,05$) fue el número de nudos por planta (cuadro No. 6).

Cuadro No. 6. Análisis estadístico por zonas de los efectos directos y residuales del paraplow sobre la respuesta del cultivo de soja.

Variable	p-valor	RP baja		RP media		RP alta	
		SD	D	SD	D	SD	D
Efecto directo							
Población (pl. m ⁻²)	n.s.	32	31	33	30	30	29
Fenología	n.s.	5,2	5,2	5,1	5,2	5,2	5,2
Altura de planta (cm)	n.s.	86	79	84	82	85	83
No. nudos planta ⁻¹	0,007	14 ^e	15 ^{de}	15 ^{cde}	14 ^f	14 ^{ef}	15 ^{bcd}
% K en hoja	n.s.	1,56	1,58	1,46	1,42	1,43	1,44
% Mg en hoja	n.s.	0,20	0,22	0,21	0,21	0,23	0,22
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	n.s.	3,73	3,62	3,69	3,77	3,94	3,98
Efecto residual							
Población (pl. m ⁻²)	n.s.	26	27	31	33	33	33
Fenología	n.s.	5,2	5,3	5,3	5,3	5,4	5,3
Altura de planta (cm)	n.s.	77	78	86	81	90	82
No. nudos planta ⁻¹	0,007	14 ^e	16 ^a	15 ^{cd}	16 ^{ab}	15 ^{abc}	16 ^a
% K en hoja	n.s.	1,27	1,47	1,31	1,37	1,32	1,37
% Mg en hoja	n.s.	0,27	0,27	0,24	0,25	0,24	0,24
Rendimiento (Mg ha ⁻¹)	n.s.	3,73	3,78	3,83	3,53	3,76	3,88

SD: siembra directa; D: descompactado; K: potasio; Mg: magnesio; n.s.: no significativo ($P > 0,05$). Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($P > 0,05$).

Sin embargo, la respuesta fue errática en el “efecto directo”, dado que en la zona mayor RP, el subsolado incrementó significativamente el número de nudos por planta, mientras que en la zona RP media sucedió lo contrario. El incremento del número de nudos por planta en los tratamientos descompactados también se produjo como “efecto residual” del paraplow, pero en este caso se dieron en las zonas RP baja y RP media, efecto contrario al encontrado en la zona RP media del análisis del “efecto directo”.

Si bien por las diferencias significativas cuantificadas como “efecto residual” en la zona de mayor RP podrían suponer incrementos en el rendimiento, no se registraron diferencias significativas, ni como “efecto residual” ni como “efecto directo” (figura No. 7).

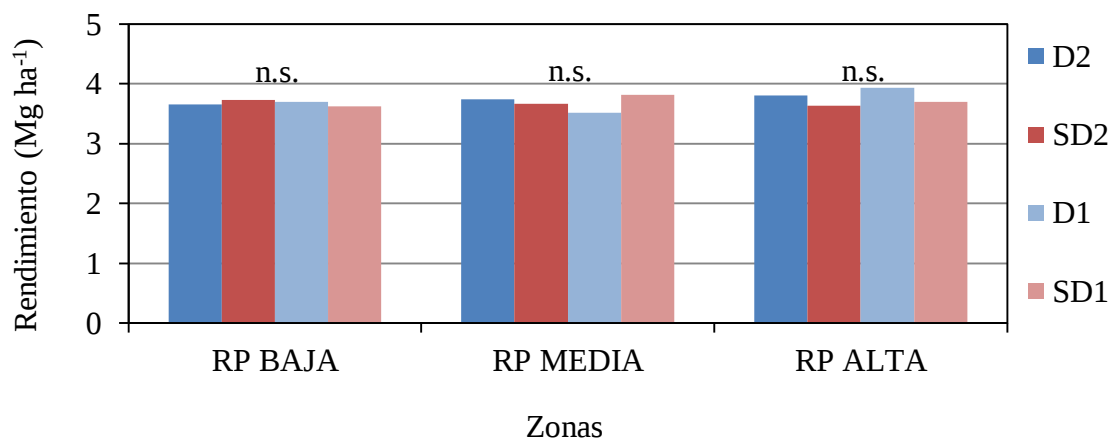


Figura No. 7. Media de los rendimientos, por tratamiento y zona.

Los rendimientos alcanzados en los tratamientos sin descompactar fueron muy similares entre sí, independientemente de los niveles de RP, los cuales fueron significativamente contrastantes entre zonas. Esto afirma nuevamente que la compactación no actuó como factor limitante del rendimiento. Aun así, existió cierta tendencia (aunque no significativa) al incremento del rendimiento en los tratamientos descompactados en la zona RP alta.

Estos resultados rechazan la primer y segunda hipótesis (hipótesis a: es posible identificar situaciones en las que la compactación actúa como factor limitante del rendimiento; hipótesis b: la labranza sub-superficial resulta una alternativa válida para levantar la restricción lo cual resulta en un incremento del rendimiento de los cultivos). Sin embargo, aquí no se rechaza la tercer hipótesis (hipótesis c: existe efecto residual de la descompactación) ya que al menos se mantuvo el efecto del paraplow sobre la RP.

4.6. ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL ENTRE RENDIMIENTO Y RP

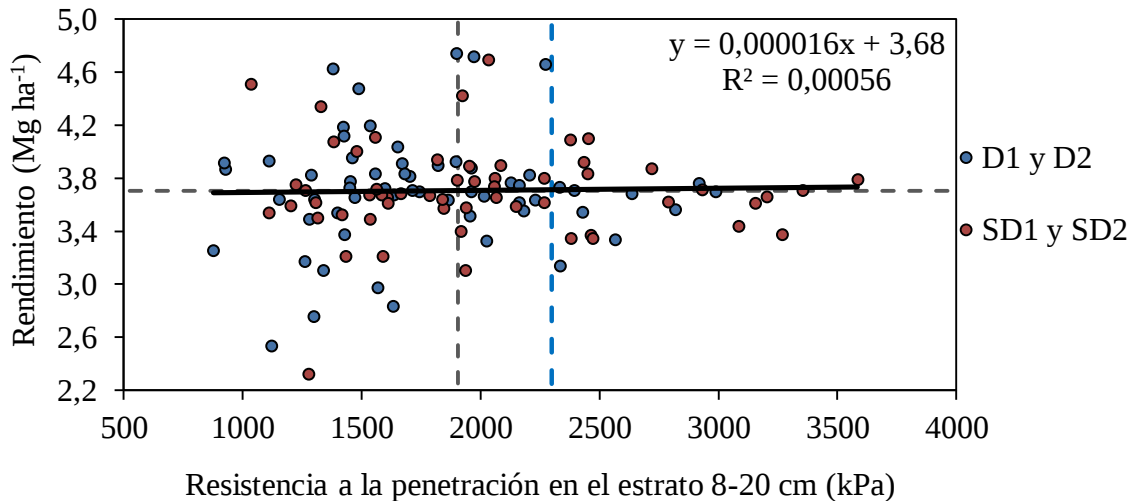


Figura No. 8. Regresión lineal entre rendimiento y resistencia a la penetración (8-20 cm).

La regresión de rendimiento con la RP en el estrato 8-20 cm fue no significativa ($P > 0,05$) mostrando un muy bajo ajuste, sin ninguna distribución clara en los cuadrantes divididos por los promedios de ambas variables (líneas grises). No obstante, rendimientos entrono a $4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ se lograron solo con $RP \leq 2300 \text{ kPa}$ (línea azul), de manera independiente de los tratamientos. Por encima de éste valor, el rendimiento tuvo escasa variabilidad entorno al promedio. La dispersión de valores estaría reflejando otras limitantes. La descompactación no resolvió el problema, mostrando nuevamente que no fue una variable determinante del rendimiento del cultivo.

Esta regresión cuestiona las tendencias encontradas por Bengough y Mullins, Taylor y Gardner, Taylor et al., citados por Martino (2001), quienes afirman reducciones de crecimiento a medida que incrementa la RP del suelo, hasta llegar al umbral de RP en el cual el crecimiento de la plata se detiene como consecuencia del incremento de esta variable, generando reducciones totales del rendimiento.

Dado que no se registraron situaciones donde la RP haya limitado el rendimiento, es posible que los valores reales en este sitio fueran inferiores al umbral crítico a partir del cual el rendimiento comienza a estar limitado por la impedancia mecánica del suelo (Gutiérrez et al., 2014), límites variables entre investigaciones, los cuales están dentro del rango de 1450-2000 kPa (Ehlers et al., Vepraskas, Gupta y Allmaras, Boone et al., citados por Díaz Zorita 2000, Thereadgill, citado por Gutiérrez et al. 2014, Mozzaquatro y Raffo 2016).

En la figura No. 9 se presentan los resultados considerando solamente las unidades de muestro de la zona RP alta, zona en la que se generó cierta tendencia (aunque no significativa) al incremento del rendimiento en los tratamientos descompactados.

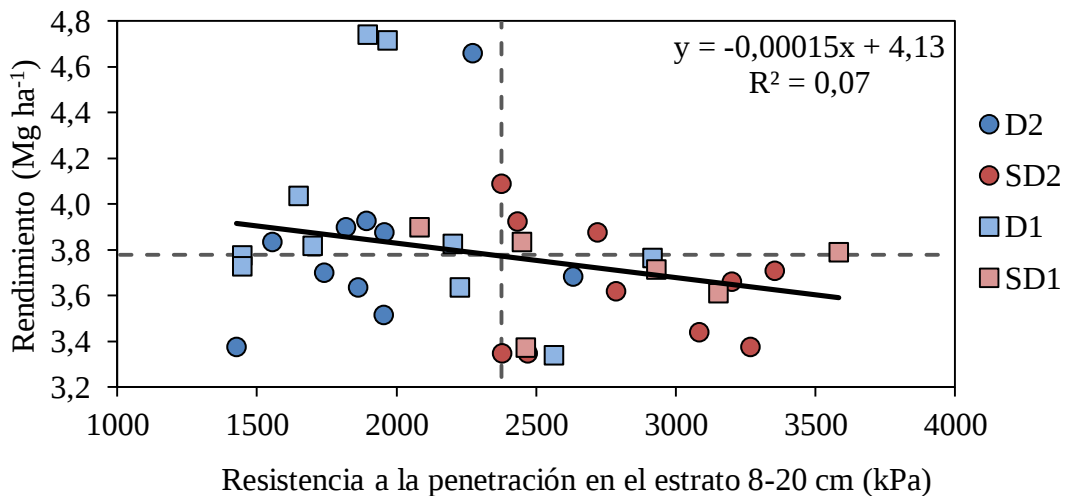


Figura No. 9. Regresión lineal entre rendimiento y resistencia a la penetración (8-20 cm) – zona RP alta.

Esta regresión presentó un mayor ajuste, aun así, el R^2 fue bajo, mientras que la significancia fue al 13% ($P = 0,13$), lo que indicó que con ese nivel de significancia la pendiente es distinta de cero.

Las líneas grises indican el promedio de ambas variables, y dividen el gráfico en cuatro cuadrantes. Los tratamientos sin descompactar se ubicaron en los cuadrantes de mayor RP y los descompactados en los cuadrantes de menor RP. Además los datos de SD para ambos años se ubicaron con mayor frecuencia en el cuadrante inferior derecho, sin embargo, la distribución de los descompactados no fue tan clara como para demostrar que efectivamente se produjo un incremento del rendimiento como consecuencia de la labranza profunda.

Si bien las diferencias no son significativas, es probable que en algunos casos los valores reales de estos sitios sí hayan estado sobre el umbral crítico, y que la labranza sub-superficial haya aliviado esta limitante del rendimiento.

5. DISCUSIÓN

El pasaje del subsolador tipo paraplow redujo significativamente la resistencia a la penetración del suelo (RP), como fue descripto también por otros autores (Braim et al. 1984, Barbosa et al. 1989, Evans et al. 1996, Varsa et al. 1997, Martino 1998, Sadras et al. 2005, Busccher et al. 2006, Cholaky et al. 2006, Álvarez et al. 2009, Botta et al. 2010, Tours et al. 2014, Ernst y Rivoir 2016, Mozzaquatro y Raffo 2016, Etchegoimberry et al. 2017, Ferreira y Rostán 2017). En promedio cuando el paraplow fue pasado 6 meses previo a la medición (“efecto directo”), se generó una disminución en los tres estratos del perfil del suelo estudiados: 0-8, 8-20 y 20-40 cm de profundidad (-259, -414 y -307 kPa respectivamente; $P \leq 0,05$). La compactación sub-superficial no fue homogénea dentro de la chacra, lo que permitió zonificarla en función de la compactación de las fajas SD. Una vez zonificada, la respuesta de la RP al subsolado fue variable de acuerdo a la zona dentro del área experimental, produciéndose solamente diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0,05$), en la zona de mayor RP (RP > 2300 kPa) en el estrato de suelo comprendido entre los 8 y 20 cm de profundidad. En esta zona y estrato, el “efecto directo” de la descompactación alcanzó una reducción del 30 % en la RP (-852 kPa). Esta respuesta se mantuvo 19 meses después del pasaje de dicha herramienta como “efecto residual” de la labor, perdurabilidad similar a la encontrada por Martino (1998), Sadras et al. (2005), Botta et al. (2006a), Botta et al. (2010), Vallejos et al. (2014), Ferreira y Rostán (2017).

Si bien la labranza sub-superficial resultó ser una alternativa válida para levantar la restricción mecánica del suelo en el corto plazo, ésta no generó un efecto positivo (directo ni residual) sobre la producción de grano en el cultivo de soja. Por tanto, la compactación sub-superficial no actuó como factor limitante del rendimiento, o sea que no existió en este trabajo una relación causa-efecto entre la RP y el rendimiento de este cultivo.

Al analizar los niveles de RP obtenidos en este trabajo (valores promedios: 926, 1903 y 2087 kPa para 0-8, 8-20 y 20-40 cm de profundidad respectivamente) es esperable encontrar respuesta en el rendimiento al subsolado, considerando que el umbral crítico de RP para el rendimiento del cultivo de soja está en torno a 1450 y 2000 kPa (Ehlers et al., Vepraskas, Gupta y Allmaras, Boone et al., citados por Díaz Zorita 2000, Thereadgill, citado por Gutiérrez et al. 2014, Mozzaquatro y Raffo 2016). Teniendo en cuenta esto, puede que la falta de respuesta esté explicada por la posible sobre-estimación de la RP, generada por la falta de humedad del suelo al momento de la medición, ya que se cuestiona la veracidad de que la medición haya sido realizada con el suelo a capacidad de campo. Es por esto que la interpretación de los datos de RP debe ser realizada cuidadosamente (Martino, 1998), ya que los valores medidos pueden diferir con las propiedades reales del suelo, al ser afectada la medición por diversos factores como el tipo de suelo, el contenido de humedad, la velocidad de penetración y las características del cono utilizado (Botta et al., 2016). En conclusión es

posible que los valores reales en este sitio estén por debajo del rango de umbrales críticos ya mencionado, explicando así la falta de respuesta del rendimiento al subsolado del suelo.

Otra posible variable que explique también la ausencia de respuesta en el rendimiento, es el adecuado régimen hídrico que tuvo este cultivo. Varios autores como Taylor y Brar (1991), Barber y Diaz, Montagu et al., citados por Sadras et al. (2005), y también este último autor, afirman que, si el cultivo puede obtener suficiente agua y nutrientes, el crecimiento por encima del suelo puede ser normal, aún si el desarrollo de las raíces se ve alterado por la compactación del suelo. Asociado a estos resultados Lowery y Schuler (1994), Colonego y Rosolem (2010), Botta et al. (2016) concluyeron que los efectos de la compactación del suelo pueden hacerse más evidentes en años secos que en años con precipitaciones por encima del promedio. Dado esto, se concluye que, al igual que en el trabajo de Varsa et al. (1997), la adecuada disponibilidad de agua que tuvo el cultivo proporcionó suficiente humedad para un alto rendimiento, pudiendo minimizar los beneficios derivados del uso del paraplow, en caso de que la RP original hayan sido suficientemente alta como para limitar los rendimientos.

Queda planteada la interrogante sobre si se perdió la residualidad del paraplow sobre el rendimiento del cultivo, o si la falta de respuesta se debió al adecuado régimen hídrico en caso de que los niveles de RP hayan sido superiores a los umbrales descriptos.

6. CONCLUSIONES

La descompactación mecánica mediante el uso del paraplow redujo la resistencia a la penetración del suelo, principalmente en las zonas del sitio experimental con mayor impedancia mecánica, y dentro de éstas en el estrato de 8-20 cm de profundidad del suelo.

La labranza sub-superficial es una alternativa válida para levantar la posible restricción física del suelo provocada por la compactación. Sin embargo, en este estudio no se generó un incremento del rendimiento del cultivo de soja como efecto de dicha labor.

La residualidad de la descompactación mecánica sobre la resistencia a la penetración del suelo se mantuvo por 19 meses, en la zona que presentó mayor resistencia a la penetración, para el estrato del suelo entre 8-20 cm de profundidad, pero esta diferencia con el testigo sin descompactar, tampoco generó incrementos en el rendimiento.

Se mantiene la necesidad de evaluar la respuesta en años con menor aporte hídrico por las precipitaciones, ya que es posible que la falta de respuesta sea consecuencia de la buena disponibilidad de agua para el cultivo generada por el año.

7. RESUMEN

En el Uruguay a partir del 2002, la agricultura se intensificó y expandió, sustituyendo al tradicional sistema de rotación de cultivo y pasturas, pasando a un sistema de agricultura continua, con la adopción tecnológica de la siembra directa y con el cultivo de soja como elemento central de la rotación. Se ha constatado que estos cambios generaron limitantes físicas, asociadas a procesos degradativos en la estructura del suelo, siendo la compactación sub-superficial el principal problema de estos sistemas. Dado esto, surge la labranza profunda como alternativa para solventar este inconveniente. En este marco se realizó esta investigación con el objetivo de evaluar el efecto del subsolador tipo paraplow sobre la resistencia a la penetración del suelo, y sobre el crecimiento y rendimiento del cultivo de soja (*Glycine max* L.), además cuantificar la duración de estos efectos positivo de la descompactación, y también poder identificar zonas dentro del sitio experimental con respuesta diferencial a esta práctica. El experimento se instaló en el departamento de Soriano, Uruguay, en una chacra perteneciente al establecimiento “El Mangrullo” (33°27'12.50"S, 57°73'70.43"O, 85 metros de elevación), desde el mes de diciembre de 2016 hasta el mes de mayo del 2017. Para dar respuesta a los objetivos planteados se evaluó el efecto de dos tratamientos denominados “siembra directa” (SD) y “descompactado sub-superficial” (D), aplicados en fajas apareadas con tres repeticiones. Ambos tratamientos se aplicaron en diseños de bloques completos al azar, iniciados en dos años sucesivos, otoño del 2015 (SD1 y D1) y del 2016 (D2 y SD2). El efecto se cuantificó en el cultivo de soja sembrado en la zafra 2016/2017, por lo que la respuesta cuantificada sobre los tratamientos aplicados en el 2016 y 2015 representan el efecto directo y residual de la descompactación respectivamente. La evidencia obtenida respalda la conclusión de que el subsolado fue efectivo para reducir la resistencia a la penetración del suelo principalmente en las zonas del sitio experimental con mayor impedancia mecánica (> 2300 kPa), y dentro de estas en el estrato de 8-20 cm de profundidad del suelo. Además se pudo observar que dichos efectos se mantuvieron 19 meses luego del pasaje del paraplow. Se concluye entonces que la labranza sub-superficial es una alternativa válida para levantar la posible restricción física del suelo provocada por la compactación y que su residualidad es de al menos 19 meses. Sin embargo, en este estudio no se generó un incremento del rendimiento del cultivo de soja, como consecuencia de este efecto.

Palabras clave: Descompactación sub-superficial; Paraplow; Soja.

8. SUMMARY

In Uruguay from 2002, agriculture intensified and expanded, replacing the traditional system of rotation of crops and pastures, changing to a continuous agricultural system and adopting the technology of direct sowing, with the cultivation of soybean as the element central crop rotation. It has been found that these changes generated physical limitations, associated with degradation processes in the soil structure, with sub-surface compaction being the main problem of these systems. Given this, deep tillage emerges as an alternative to solve this problem. In this context this research was conducted in order to evaluate the effect of paraplow on penetration resistance of the soil and on the growth and yield of soybean (*Glycine max* L.), also quantify the duration of these positive effects of this work, and also be able to identify zones within the experimental site with differential response to this practice. The experiment was installed in the department of Soriano, Uruguay, in a field belonging to the property "El Mangrullo" (33°27'12.50 "S, 57°73'70.43" O, 85 meters elevation), from December from 2016 until May 2017. In order to respond to the proposed objectives, the effect of two treatments called "direct seed" (SD) and "sub-surface decompacted" (D), applied in paired strips with three repetitions, was evaluated. Both treatments were applied in randomized complete block designs, initiated in two successive years, fall of 2015 (SD1 and D1) and of 2016 (D2 and SD2). The effect was quantified in soybean seed culture harvest 2016/2017, so that the response quantized on the treatments applied in 2016 and 2015 represent the direct and residual effect decompaction respectively. The obtained evidence supports the conclusion that the subsoiling was effective to reduce the resistance to the penetration of the soil, mainly in the zones of the experimental site with higher mechanical impedance (> 2300 kPa), and within these in the stratum of 8-20 cm of soil depth. It was also observed that these effects were maintained 19 months after the passage of the paraplow. It is concluded that the sub-surface tillage is a valid alternative to lift the possible physical restriction of the soil caused by the compaction and that its residuality is at least 19 months. However, this study did not generate an increase in the yield of the soybean crop, as a consequence of this effect.

Keywords: Sub-surface decompaction; Paraplow; Soybean.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Alliaume, F.; Rossing, W. A. H.; García, M.; Giller, K. E.; Dogliotti, S. 2013. Changes in soil quality and plant available water capacity following systems re-design on commercial vegetable farms. *European Journal of Agronomy*. 46: 10-19.
2. Allmaras, R. R.; Juzwik, J.; Overton, R. P.; Copeland, S. M. 1994. Soil Compaction; Causes, Effects, Management in Bareroot Nurseries. In: Northeastern and Intermountain Forest and Conservation Nursery Association Meeting (1993, St. Louis, Missouri). Reports. St. Louis, USDA. Forest Service. pp. 19-32 (General Technical Reports).
3. Álvarez, C. R.; Torres, M.; Chamorro, E. R.; D'Ambrosio, D.; Taboada, M. A. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa; efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo*. 27(2): 159-169.
4. Barbosa, L. R.; Díaz, O.; Barber, R. G. 1989. Effects of deep tillage on soil properties, growth and yield of soya in a compacted ustochrept in Santa Cruz, Bolivia. *Soil and Tillage Research*. 15: 51-63.
5. Botta, G. F.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Rossato, H. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic in ten sites; effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil and Tillage Research*. 78(1): 53-58.
6. _____.; _____.; _____.; Ressia, M.; Ferrero, C.; Rosatto, H.; Tourn, M. 2006a. Deep tillage and traffics on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annus* L.). *Soil and Tillage Research*. 91(1): 164-172.
7. _____.; _____.; Rosatto, H.; Ferrero, C. 2006b. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the rolling Pampa region of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 86(1): 9-14.
8. _____.; Tolón, A.; Lastra, 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(1): 167-174.
9. _____.; _____.; _____.; _____.; Balbuena, R.; Rivero, D. 2013. Continuous application of direct sowing; traffic effect on subsoil compaction and maize (*Zea mays* L.) yields in Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*. 101(1): 44-51.

10. _____.; _____.; Rivero, D.; Laureda, D.; Ramírez, M.; Lastra, X.; Agnes, D.; Flores, I. M.; Pelizzari, F.; Martiren, V. 2016. Compaction produced by combine harvest traffic; effect on soil and soybean (*Glycine max* L.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. *European Journal of Agronomy*. 74(1): 155-163.
11. Braim, M. A.; Chaney, K.; Hodgson, D. R. 1984. Preliminary investigation on the response of spring barley (*Hordeum sativum*) to soil cultivation with the Paraplow. *Soil and Tillage Research*. 4(1): 277-293.
12. Busccher, W. J.; Bauer, P. J.; Frederick, J. R. 2006. Deep tillage management for high strength southeastern USA Coastal Plain soils. *Soil and Tillage Research*. 85: 178-185.
13. Bustamante, M.; Espínola, A. 2015. Estudio del efecto de la población sobre el rendimiento en soja en condiciones hídricas no limitantes. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 64 p.
14. Calonego, J. C.; Rosolem, C. A. 2010. Soybean root growth and yield in rotation with cover crops under chiseling and no-till. *European Journal Agronomy*. 33: 242-249.
15. Cazorla, C. R.; Masiero, B. 2006. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo siembra directa en Marcos Juárez. *In*: Díaz-Roselló, R. ed. *Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur*. Montevideo, PROCISUR. pp. 123-132.
16. Cholaky, C.; Cisnero, J. M.; Uberto, M.; Vignolo, C.; Giayetto, O. 2006. Degradación; Recuperación de la condición hidrofísica de haplustoles/udoles del sur cordobés manejados con siembra directa. *In*: Díaz-Roselló, R. ed. *Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur*. Montevideo, PROCISUR. pp. 97-108.
17. Correndo, A. A.; García, F. O. 2012. Concentración de nutrientes en planta como herramienta de diagnóstico; cultivos extensivos. *IPNI Cono Sur*. no. 14: 8 p.
18. Corwin, D. L.; Lesch, S. M.; Oster, J. D.; Kaffka, S. R. 2006. Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*. 131: 369-387.

19. Cubilla, M.; Reinert, D. J.; Aita, C.; Reichert, J. M. 2002. Plantas de cobertura do solo; uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direta. *Plantio Direto*. 71: 29-32.
20. da Silva, A. P.; Kay, B. D. 1996. The sensitivity of shoot growth of corn to the leas limiting water range of soils. *Plant and Soil*. 184: 323-329.
21. _____.; _____.; Perfect, E. 1997. Management versus inherent soil properties effects on bulk density and relative compaction. *Soil and Tillage Research*. 44: 81-93.
22. DeJong-Hughes, J. s.f. Tires, Traction and Compaction. (en línea). Morris, University of Minnesota. s.p. Consultado 3 oct. 2017. Disponible en <https://www.extension.umn.edu/agriculture/soils/tillage/tires-traction-and-compaction/#references>
23. _____.; Moncrief, J. F.; Voorhees, W. B.; Swan, J. B. 2001. Soil compaction; causes, effects and control. (en línea). Morris, University of Minnesota. s.p. Consultado 14 abr. 2017. Disponible en <https://www.extension.umn.edu/agriculture/soils/tillage/soil-compaction/>
24. Dexter, A. R. 1988. Advances in Characterization of Soil Structure. *Soil and Tillage Research*. 11(1): 199-238.
25. _____. 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*. 20(1): 87-100.
26. Díaz Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interaction on dry land corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*. 54: 11-19.
27. Ernst, F.; Rivoir, P. 2016. Mapeando la respuesta de soja a la descompactación sub-superficial del suelo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 62 p.
28. Ernst, O.; Bentancur, O. 2004. Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de $N-NO_3^-$ en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. *Agrociencia* (Montevideo). 8(1): 29-40.
29. _____.; Siri, G. 2011. La agricultura en el Uruguay, su trayectoria y consecuencias. In: *Simposio Nacional de Agricultura* (2º., 2011, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 149-163.

30. Etchegoimberry, P.; Izaguirre, R.; Ernst, O. 2017. Factores limitantes asociados a la variabilidad espacial y temporal del rendimiento de soja. *In*: Simposio Nacional de Agricultura (5°, 2017, Paysandú). Al futuro no alcanza con llegar. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 125-132.
31. Evans, S. D.; Lindstrom, M. J.; Voorhees, W. B.; Moncrief, J. F.; Nelson G. A. 1996. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil and Tillage Research*. 38: 35-46.
32. Fassio, A.; Rodríguez, M. J.; Ibáñez, W.; Pérez, O.; Ceretta, S.; Restaino, E.; Rabaza, C.; Verguara, G. 2014. Modelo de predicción para los estadios fenológicos del cultivo de soja; nueva herramienta web. *Revista INIA*. no. 39: 40-43.
33. Fehr, W. R.; Caviness C. E. 1977. Stages of Soybean Development. Iowa State University. Special Report no. 80. 12 p.
34. Ferreira, R.; Rostán, F. 2017. Efecto directo y residual de la descompactación subsuperficial sobre el cultivo de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 43 p.
35. García Préchac, F.; Ernst, O.; Siri Prieto, G.; Terra, J. A. 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*. 77(1): 1-13.
36. Giménez, L. 2010. Efectos de la disponibilidad hídrica en diferentes etapas de desarrollo de maíz y soja. *In*: 1er Seminario Internacional de riego en cultivos y pasturas (1°, 2010, Paysandú). Potencial del riego extensivo en cultivos y pasturas. Montevideo, INIA. pp. 29-37.
37. _____.; García, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia* (Montevideo). 15(2): 100-108.
38. Gutiérrez, F.; Vaca, V. M.; Pérez, D. de J.; Franco, O.; Rubí, M.; Castañeda, A.; Morales, E. J. 2014. Compactación mecánica en suelos Vertisol. *Ciencias Agrícolas Informa*. 23(2): 7-21.
39. Håkansson, I.; Voorhees, W. B.; Elonen, P.; Raghavan, 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 and Tillage Research*. 10: 259-268.

40. Hamza, M. A.; Anderson, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems, a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*. 82: 121-145.
41. Harris, W. L. 1971. The soil compaction process. *In*: Barnes, K. K. ed. *Compaction of agricultural soils*. St. Joseph, Michigan, USA, American Society of Agricultural Engineers. pp. 9-44.
42. Ishaq, M.; Hassan, A.; Saeed, M.; Ibrahim, M.; Lal, R. 2001a. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan; I. Soil physical properties and crop yield. *Soil and Tillage Research*. 59(1): 57-65.
43. _____.; Ibrahim, M.; Hassan, A.; Saeed, M.; Lal, R. 2001b. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan; II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil and Tillage Research*. 60(1): 153-161.
44. Kantolic, G.; Giménez, P. I.; De La Fuente, E. B. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y la calidad en soja. *In*: Satorre, E. H.; Benech Arnold, R. L.; Slafer, G. A.; De La Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E.; Savin, R. eds. *Producción de granos; bases funcionales para su manejo*. Buenos Aires, Argentina, Universidad de Buenos Aires. Facultad de Agronomía. pp. 167-186.
45. Karam, R. M.; Sfeir, F.; Mounzer, O.; Rouphael, Y. 2005. Evapotranspiration and seed yield of field grown soybean under deficit irrigation conditions. *Agricultural Water Management*. 75: 226-244.
46. Kozłowski, T. T. 1999. Soil compaction and growth of woody plants. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 14: 596-619.
47. Lowery, B.; Schuler, R. T. 1994. Duration and effects of compaction on soil and plant growth in Wisconsin. *Soil and Tillage Research*. 29: 205-210.
48. Martino, D. 1994. *Agricultura sostenible y siembra directa*. Montevideo, INIA. 31 p. (Serie Técnica no. 50).
49. _____. 1997. *Siembra directa en los sistemas agrícola ganaderos del litoral*. Montevideo, INIA. 28 p. (Serie Técnica no. 82).
50. _____. 1998. *Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay*. Thesis PhD. Manitoba, Canada. University of Manitoba. 264 p.

51. _____. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. *In*: Díaz-Roselló, R. ed. Siembra directa en el cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 225-257.
52. MGAP. DSA. DIRENARE (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. División de Suelos y Aguas. Dirección Nacional de Recursos Naturales, UY). 2006. Compendio actualizado de información de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1: 1.000.000. 1 disco compacto.
53. _____. PRENADER (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. Proyecto de Manejo de los Recursos Naturales y Desarrollo del Riego, UY). 2010. Cartografía de suelos CONEAT. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 9 ago. 2017. Disponible en <http://web.renare.gub.uy/js/visores/coneat>
54. Moreno, J. L. 2009. Introducción a la geoestadística y su aplicación. México, D. F., s.e. 151 p.
55. Morgan, M. T.; Holmes, R. G.; Wood, R. K. 1993. A system for measuring soil physical properties in the field. *Soil and Tillage Research*. 26: 301-325.
56. Morón, A.; Quincke, A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. *In*: Jornada Técnica (2010, Mercedes, UY). El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Montevideo, INIA. pp. 5-10 (Actividades de Difusión no. 605).
57. Motavalli, P. 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 and Tillage Research*. 71: 121-131.
58. Mozzaquatro, R.; Raffo, M. A. 2016. Respuesta de soja a la descompactación sub-superficial del suelo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 52 p.
59. Pilatti, M. A.; de Orellana, J.; Imhoff, S. del C.; Pires, A. 2012. Actualización de los límites críticos del intervalo hídrico óptimo. *Ciencia del Suelo*. 30(1): 9-21.
60. Ponce de León, F.; Martino, D. L.; Díaz Lago, J. E. 1999. Agronomía de la Canola. *In*: Martino, D. L.; Ponce de León, F. eds. Canola; una alternativa promisorio. Montevideo, INIA. pp. 9-80 (Serie Técnica no. 105).

61. Pravia, V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio-temporal en la investigación de cultivos agrícolas, A) impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis MSc. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 102 p.
62. Quiroga, A. R.; Buschiazso, D. E.; Peinemann, N. 1999. Soil compaction is related management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil and Tillage Research*. 52: 21-28.
63. Sadras, V. O.; O'Leary, G. J.; Roget, D. K. 2005. Crop responses to compacted soil; capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. 91(2): 131-148.
64. Sawchik, J. 2007. Algunas restricciones físicas e hídricas para el crecimiento de los cultivos en Uruguay. In: Díaz-Roselló, R. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 165-169.
65. Scarlato, G.; Buxedas, M.; Franco, J.; Pernas, A. 2001. Siembra directa en la agricultura del litoral oeste uruguayo; adopción y demandas de investigación y difusión. In: Adopción y demanda de investigación y difusión en siembra directa; encuesta a la agricultura y lechería del suroeste del Uruguay. Montevideo, INIA. pp. 21-102 (FPTA no. 06).
66. Siczek, A.; Lipiec, J. 2011. Soybean nodulation and nitrogen fixation in response to soil compaction and surface straw mulching. *Soil and Tillage Research*. 114: 50-56.
67. Singh, J.; Salaria, A.; Kaul, A. 2015. Impact of soil compaction on soil physical properties and root growth; a review. *International Journal of Food, Agriculture and Veterinary Sciences*. 5(1): 23-32.
68. Soane, B. D.; Blackwell, P. S.; Dickson, J. W.; Painter, D. J. 1981. Compaction by agricultural vehicles; a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage Research*. 1: 207-237.
69. _____.; van Ouwerkerk, C. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. In: Soane, B. D.; van Ouwerkerk, C. eds. *Soil compaction in Crop Production*. Amsterdam, Elsevier. pp. 1-21.

70. Taylor, H. M.; Brar, G. S. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*. 19: 111-119.
71. Tours, S.; Agostin, M. D. L. A.; Studdert, G. 2014. Paraplow y cultivos de cobertura; efecto sobre algunas propiedades físicas bajo siembra directa. (en línea). Buenos Aires, Argentina, s.e. 11 p. Consultado 18 oct. 2017. Disponible en <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/paraplow-cultivos-cobertura-efecto-t31629.htm>
72. Vallejos, A.; Kees, M.; Bondia, P.; Echeverría, N.; Silenzi, J.; Zajac, C.; De Lucia, M. 2014. Subsulado en siembra directa; efectos sobre parámetros físicos del suelo y el rendimiento de soja. *Ciencia del Suelo*. 32(2): 291-300.
73. Varsa, E. C.; Chong, S. K.; Abolaji, J. O.; Farquhar, D. A.; Olsen, F. J. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil and Tillage Research*. 43: 219-228.
74. Vega, C.; Andrade, F. 2000. Densidad de planta y espaciamiento entre hilera. In: Andrade, F. H.; Sadras, V. O. eds. Bases para el manejo del maíz, el girasol y la soja. Buenos Aires, Argentina, INTA Balcarce/UNMP. Facultad de Ciencias Agrarias. pp. 97-133.
75. Whalley, W. R.; Domitrub, E.; Dexter, A. R. 1995. Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*. 35: 53-68.
76. Wolkowski, R.; Lowery, B. 2008. Soil compaction; causes, concerns, and cures. Madison, Wisconsin, University of Wisconsin. 8 p.