

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

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

por

Ma. del Rocío KRALL MAIANTI
Ignacio Nicolás PRIETO LISTUR

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. Mónica Cadenazzi Pascual

Ing. Agr. Guillermo Siri-Prieto

Fecha: 7 de noviembre de 2018

Autores: -----
Ma. del Rocío Krall Maianti

Ignacio Nicolás Prieto Listur

AGRADECIMIENTOS

A nuestra familia y amigos, por su apoyo a lo largo de nuestra carrera y trabajo final.

Al profesor Oswaldo Ernst y ayudantes Pilar Etchegoinberry y Ramiro Izaguirre por hacer posible este trabajo.

A Edith por su aporte en el análisis de muestras de suelo.

A Sully Toledo por su disponibilidad y correcciones realizadas.

Al proyecto AUSID: INIA FPTA 337, en el que se enmarcó este trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	3
2.1 COMPACTACIÓN DEL SUELO	3
2.2 MAQUINARIA AGRÍCOLA COMO AGENTE CAUSAL DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO	4
2.3 EFECTO DE LA COMPACTACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO	5
2.3.1 <u>Materia orgánica</u>	6
2.3.2 <u>Resistencia a la penetración</u>	7
2.3.3 <u>Densidad aparente y porosidad</u>	7
2.3.4 <u>Dinámica del agua en el suelo</u>	8
2.3.5 <u>Conductividad eléctrica</u>	10
2.4 EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN LOS CULTIVOS.....	11
2.5 MEDIDAS PARA REDUCIR EL IMPACTO DE LA COMPACTACIÓN EN EL SISTEMA	13
2.5.1 <u>Descompactación biológica</u>	13
2.5.2 <u>Medidas asociadas a la maquinaria</u>	15
2.5.3 <u>Descompactación mecánica</u>	16
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	20
3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL	20
3.2 TRATAMIENTOS.....	20
3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL	21
3.4 MANEJO DEL CULTIVO	22
3.5 MUESTREOS	22
3.5.1 <u>Determinaciones en suelo</u>	22
3.5.1.1 Muestreos de suelos para análisis químicos	23
3.5.2 <u>Determinaciones en el cultivo</u>	23

3.6	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS	24
4.	<u>RESULTADOS</u>	25
4.1	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA	25
4.2	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EXPERIMENTAL. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA	27
4.2.1	<u>Propiedades químicas</u>	27
4.2.2	<u>Propiedades físicas</u>	29
4.2.3	<u>Zonas de compactación diferencial</u>	29
4.3	DESCOMPACTACIÓN MECÁNICA	30
4.3.1	<u>Efecto de la descompactación sub superficial sobre la Rp.</u>	30
4.3.2	<u>Efecto de la descompactación sub-superficial sobre propiedades químicas</u>	34
4.3.2.1	Conductividad eléctrica (CE).....	34
4.3.2.2	Otras propiedades evaluadas	35
4.3.3	<u>Respuesta del maíz a la descompactación sub superficial</u>	37
4.3.3.1	Rendimiento.....	37
4.3.3.2	Otras variables de respuesta evaluadas	38
4.4	ANÁLISIS DE CLASIFICACIÓN Y REGRESIÓN	40
5.	<u>DISCUSIÓN</u>	43
6.	<u>CONCLUSIONES</u>	46
7.	<u>RESUMEN</u>	47
8.	<u>SUMMARY</u>	48
9.	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	49
10.	<u>ANEXOS</u>	57

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Manejo del cultivo	22
2. Propiedades químicas del suelo para la zona correspondiente a siembra directa (pre tratamiento D) agrupada por el año de realizada la descompactación sub_superficial del suelo (año).	28
3. Conductividad eléctrica media (20cm) en respuesta al tratamiento.....	34
4. Valor P del análisis de varianza para bases intercambiables (Ca, Mg y K), conductividad eléctrica en muestra saturada (μ s), acidez titulable, pH al agua y a pH KCl, fósforo disponible (Bray I) y carbono orgánico (C) en el estrato 0-10 y 10 20 cm	36
5. Carbono orgánico del suelo (%), en los primeros 10 cm de suelo, en función de los tratamientos sin laboreo (SD) y descompactado sub_superficialmente (D).....	37
6. Respuesta promedio en rendimiento de maíz a la descompactación sub_superficial del suelo	37
7. Análisis estadístico de diferentes variables medidas en el cultivo	39

Figura No.

1. Mapa de diseño del ensayo y grilla de muestreo	21
2. Precipitaciones entre noviembre 2016 y junio 2017, en comparación al período 1961 – 1990 y la ubicación temporal de las diferentes etapas del ciclo del cultivo	26
3. Temperatura registrada entre noviembre 2016 y junio 2017 en relación a la serie histórica entre los años 1961 y 1990.	27
4. Resistencia a la penetración en función de la profundidad de suelo para los tratamientos testigos (SD)	29
5. Delimitación espacial de la resistencia a la penetración del suelo en el estrato 12-40 cm para los tratamientos siembra directa (SD).	30
6. Perfil de resistencia a la penetración (Rp) en diciembre del 2016 para los tratamientos siembra directa (SD) y descompactado (D) en 2014, 2015 (izquierda) y 2016 (derecha)	31
7. Resistencia a la penetración en relación a la interacción año*tratamiento para el rango de profundidad de 4-10 cm.	32
8. Resistencia a la penetración en relación a la interacción año*tratamiento*zona.....	33
9. Resistencia a la penetración en función de la interacción entre zona*tratamiento en el estrato de 12-40cm.....	33

10. Conductividad eléctrica media a una profundidad de 40 cm en función de la zona de compactación	35
11. Rendimiento de maíz en función de la interacción con el año de efectuada la descompactación.	38
12. Número de plantas en estado V6 en función de la interacción entre año*tratamiento	39
13. Árbol de clasificación y regresión.....	41
14.Relación Ca/Mg de 0-10cm en función de la interacción entre año*tratamiento	44

1. INTRODUCCIÓN

A inicios de la década del 2000, con el aumento del precio de los granos y de la demanda, se produjo un proceso de intensificación y expansión de la agricultura en Uruguay. Simultáneamente existió un cambio en el sistema de producción, de agricultura-pasturas en labranza convencional a un sistema de agricultura continua generalmente bajo siembra directa, donde predominó el cultivo de soja. Si bien la siembra directa presenta ciertas ventajas en comparación con la labranza convencional, como la reducción de la erosión mediante el efecto cobertura, mejora de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, esta práctica a largo plazo puede conducir a la degradación del suelo, causada principalmente por la compactación del mismo.

Este podría ser uno de los motivos por el cual varios autores cuestionan la sostenibilidad de este proceso y atribuyen el estancamiento de los rendimientos de los cultivos y la mayor demanda de nutrientes para obtener el mismo rendimiento, al deterioro de la calidad del suelo generada por el propio sistema de producción. Además existe un punto en el cual el rendimiento alcanzable de los cultivos disminuye independientemente del aumento de los insumos aplicados, indicando una limitante estructural (Ernst y Siri-Prieto, 2013).

La compactación del suelo afecta la fertilidad física del suelo, en particular el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, a través del aumento de la densidad del suelo, la disminución de la porosidad, el aumento de la resistencia, la disminución de la infiltración y retención de agua. El crecimiento de las raíces y de la fauna del suelo también se reduce.

Las principales causas de la degradación de la estructura del suelo son las fuerzas de las ruedas de la maquinaria y los implementos agrícolas, especialmente cuando el suelo está húmedo o saturado, momento en que el suelo es más propenso a la deformación.

Una seria limitante es que la degradación del suelo causada por la compactación es difícil de localizar y revertir, más aún cuando se trata de compactación sub-superficial. Debiéndose recurrir a análisis físicos para identificar su extensión.

La compactación sub-superficial tiene como gran desventaja la de ser acumulativa, ya que el ciclo de labores convencionales no involucra esos horizontes. Además, al ubicarse a mayor profundidad recibe mucho más atenuados los efectos de los agentes descompactadores naturales, tales como ciclos de seca-humedad y la actividad biológica de raíces e insectos.

La percepción sobre la existencia de compactación del suelo por el medio productivo ha llevado a proponer la disrupción mecánica de capas compactadas con implementos de labranza profunda (por ejemplo, “para-till”, “para-plow”).

Por este motivo los objetivos del presente trabajo son, limitar zonas a partir de la resistencia a la penetración, que puedan ser tratadas diferencialmente. Identificar un nivel crítico de referencia de este indicador, a partir del cual exista una respuesta en rendimiento que justifique el pasaje de una herramienta de labranza profunda, como lo es el paraplow. Por último, evaluar la residualidad del efecto del paraplow.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 COMPACTACIÓN DEL SUELO

La compactación del suelo es la compresión del suelo por fuerzas externas que disminuyen el volumen del espacio poroso mientras aumenta la densidad del suelo (Harris, citado por Singh et al., 2015).

Estos cambios afectan muchas propiedades físicas y procesos del suelo en mayor o menor medida, incluyendo la capacidad de aire y el intercambio gaseoso, la retención del agua y la conducción hidráulica, la resistencia del suelo y la impedancia mecánica para el crecimiento de las raíces e incidirán indirectamente en muchos procesos químicos y biológicos (Hakansson et al., 1988). Estos cambios en las propiedades físicas pueden conducir a una supresión del rendimiento a largo plazo.

El grado de compactación depende de, la resistencia mecánica del suelo, que está influenciada por propiedades intrínsecas del suelo tales como la textura y los contenidos de materia orgánica del suelo (Larson et al., citados por Singh et al., 2015), de la estructura del mismo y contenido hídrico, al momento de realizadas las prácticas agrícolas. Además depende de factores asociados a la maquinaria agrícola como la carga por ejes, numero de pasadas y presión de inflado de los neumáticos, entre otros (Singh et al., 2015).

Jorajuría et al., citados por Jorajuría y Draghi (2000), proponen dividir la compactación inducida por tráfico agrícola en dos problemas diferentes. Diferentes por la responsabilidad independiente que encuentran en las variables peso sobre el eje y presión en el área de contacto rueda/suelo. Diferentes también por la magnitud del problema que ocasionan, y además diferentes, por la evolución, persistencia y posibilidades de ser conjurados por agentes naturales con el paso del tiempo. Dichos problemas son:

1. Compactación superficial: disminución del volumen de macroporos producido dentro del horizonte arable anualmente (Ap).

2. Compactación sub_superficial: disminución del espacio poroso inducida por debajo del Ap por transmisión de las presiones que el rodado ejerce sobre el suelo.

La primera de efecto a corto plazo, y con mayor efectos de agentes descompactadores naturales y la segunda con efectos acumulativos a largo plazo, más difíciles de revertir.

La principal causa de compactación, como se mencionó anteriormente, es la fuerza ejercida sobre el suelo por parte de las ruedas de la maquinaria y

los implementos agrícolas, especialmente cuando el suelo está húmedo o saturado.

2.2 MAQUINARIA AGRÍCOLA COMO AGENTE CAUSAL DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO

El pasaje de la maquinaria agrícola genera compactación a través, tanto de la distribución de la presión en el área de contacto rueda/suelo, como de la carga por eje que presente dicho implemento. Este efecto se puede producir con altas cargas por eje en pocas pasadas, así como con menores cargas y un mayor número de pasadas. La presión ejerce mayor impacto en la capa superficial del suelo y la carga por eje en capas adyacentes (Olsen, 1994).

Un factor que varía el área de contacto rueda/suelo es la presión de inflado de los neumáticos, una alta presión disminuye dicha área, lo cual genera mayor impacto en la compactación. Por el contrario cuando la presión de inflado es baja se obtiene una mayor área de contacto como también una mejor distribución de esta, disminuyendo así la compactación generada (Alakukku et al., 2003).

Para el número de pasadas, Jorajuría y Draghi (2000) concluyen que, reiteradas pasadas sobre la misma senda, puede emular, e incluso reemplazar, al factor peso sobre el eje, en la responsabilidad principal de inducir compactaciones en el subsuelo.

Sommer y Altemüller, citados por Alakukku et al. (2003) afirman que, la profundidad de la capa compactada se hacía mayor a medida que aumentaba el número de pasadas en la misma pista.

Con respecto a la carga por eje, Logsdon et al. (1992) encontraron que el tráfico con una carga de eje de 18 Mg. en un suelo franco arcilloso en Minnesota con un contenido de humedad ligeramente menor que la capacidad de campo causó compactación estadísticamente significativa a una profundidad de por lo menos 65 cm. Paralelamente otros autores como Alakukku y Elonen, Schonning y Rasmussen, citados por Hakansson y Reeder (1994) encontraron incrementos en la densidad aparente y resistencia a la penetración en el subsuelo como resultado del tráfico con un vehículo con carga por eje de 10 Mg. Los datos en esos estudios se obtuvieron 5-6 años después del tráfico, lo que da señal de la persistencia del efecto de la compactación.

Además cabe destacar que las observaciones mencionadas anteriormente provienen de áreas donde se produce procesos de congelación/descongelación, de gran efecto en la descompactación natural, por tanto en regiones en las que no se produce dicho fenómeno, la compactación

del subsuelo (>de 40 cm), podría considerarse permanente. Con respecto a esto Hakansson y Reeder (1994), separan la compactación del suelo según la profundidad de la misma, en una capa que va de 0 a 25 cm, denominada capa de arada, otra de 25 a 40 cm, parte superior del subsuelo y > de 40 cm, subsuelo, donde mencionan que la persistencia de la compactación puede durar 4-5 años, 10 años y permanente, para dichas capas respectivamente.

Varios de los autores citados, hacen mención de que el efecto de la maquinaria en la generación de la compactación se ve agravado con un mayor contenido de humedad (estado de plasticidad), y alto contenido de arcilla. Esto se explica porque el estado de plasticidad del suelo habilita a las arcillas a cambiar de forma cuando actúa una fuerza externa superior a las fuerzas cohesivas y mantener esa forma cuando la fuerza deja de ser aplicada, y el suelo pierde humedad (Mellor, citado por García et al., 2004).

El aumento del contenido de humedad provoca una reducción en la capacidad de soporte de carga del suelo (Kondo y Días Junior, 1999) quedando así susceptible a la compactación.

2.3 EFECTO DE LA COMPACTACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO

La estructura de un suelo refiere a su arquitectura, es decir, la forma en que están ordenados las partículas sólidas y los espacios. La descripción de la estructura del suelo se refiere al tamaño y forma de las unidades de suelo o agregados y los espacios de aire o poros dentro y entre ellos. Los agregados están constituidos por partículas de suelo individuales ligados con materia orgánica, arcilla y hierro (FAO, s.f.).

La estructura del suelo y su estabilidad juegan un rol fundamental en muchos procesos del suelo y su interacción con las plantas: erosión, infiltración de agua, capacidad de drenaje, almacenamiento de agua, retención de nutrientes, exploración radicular, aireación y resistencia mecánica. Esto indica que todas las prácticas agronómicas deberían hacerse con particular énfasis de conservación de la misma.

Pueden utilizarse varios parámetros para caracterizar el estado de compactación del suelo o estructura que presenta el mismo, como la resistencia a la penetración, densidad aparente, la porosidad, conductividad hidráulica, conductividad eléctrica, materia orgánica.

2.3.1 Materia orgánica

La materia orgánica tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de intercambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo, los autores mencionan que aumenta la capacidad de intercambio catiónico del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal y la capacidad buffer del suelo, favorece también la acción de los abonos minerales y facilita su absorción por parte de las raíces. En cuanto a su efecto sobre las propiedades biológicas, favorece los procesos de mineralización, el desarrollo de la cubierta vegetal, sirve de alimento a una multitud de microorganismos y estimula el crecimiento de la planta en un sistema ecológico equilibrado (Julca, 2006).

Mantener una cantidad adecuada de materia orgánica estabiliza la estructura del suelo, la hace más resistente a la degradación (Cochrane y Aylmore 1994, Thomas et al., citados por Hamza y Anderson 2005) y disminuye la densidad aparente y resistencia del suelo. Sparovek et al., Carter, citados por Hamza y Anderson (2005) señalan también la importancia del tipo de materia orgánica. La fracción fácilmente oxidable parece ser más relevante que la materia orgánica total para determinar el comportamiento mecánico del suelo (Ball et al., 2000). Por otro lado, cuanto menos humificada sea la materia orgánica, mayor será su efecto en el aumento de la porosidad y, por lo tanto, mayor será la disminución de la resistencia a la tracción agregada (Zhang, 1994).

Diversos autores encontraron que el mayor contenido de carbono orgánico y la falta de remoción del suelo podrían ser los responsables de la mayor agregación en SD en comparación con LC (Chagas et al. 1994, Elissondo et al. 2001). Reyes et al., citados por Martínez et al. (2008), encontraron en un trabajo realizado en Chile Central un aumento de la humedad aprovechable cercano a 30% en un suelo manejado con cero labranza por cuatro años comparado con labranza convencional en los primeros 5 cm del perfil de suelo. Este resultado se asoció a un aumento de 2,2 a 3,0 % de MOS a igual profundidad.

En cuanto a la compactación del suelo causada por maquinaria pesada, por lo discutido anteriormente, se esperaría para un mismo suelo con niveles diferentes de materia orgánica, mayor soporte de carga a mayor contenido de la misma. Hamza y Anderson (2005), citan que la compactación afecta a la mineralización del carbono orgánico del suelo y del nitrógeno (Neve y Hofman, 2000) así como la concentración de dióxido de carbono en el suelo (Conlin y Driessche, 2000).

2.3.2 Resistencia a la penetración

La resistencia de un suelo a la penetración (R_p) es un índice integrado de la compactación de suelo, contenido de humedad, textura y tipo de arcilla. Es una determinación que implica a la consistencia y estructura del suelo. El instrumento usado para determinarla se denomina penetrógrafo y mide la fuerza necesaria para penetrar el suelo con una sonda (García et al., 2004). Es considerado un buen indicador de la compactación del suelo debido a que refleja la resistencia del suelo a la penetración de las raíces, además se considera más sensible que la densidad aparente para evaluar la reacción del suelo al tráfico (Soracco et al., 2014). Zhang et al., citados por Singh et al. (2015), encontraron que este índice se correlacionó significativa y negativamente con el contenido de agua en el suelo en el momento de la medición.

Varios autores encontraron que, suelos manejados con siembra directa suelen presentar valores de resistencias a la penetración más elevados y, en algunos casos, aumento de la densidad aparente (Díaz Zorita et al. 2002, Álvarez et al. 2006). Ello es atribuible a la ausencia de remoción, sumado al efecto compactante derivado del pasaje de maquinarias (Botta et al., 2006). El tráfico agrícola con frecuencia provoca aumentos en este parámetro del orden de 100% o más (Soane et al. 1975, Voorhees et al., citados por Hakansson et al. 1988).

Vieira Cavalieri et al. (2009) están también entre quienes confirman una evolución negativa de parámetros físico-mecánicos de los suelos bajo SD.

Como buen indicador del estado físico del suelo se ha buscado encontrar una referencia crítica que indique a partir de qué valor surgen efectos negativos que limiten el potencial de crecimiento de los cultivos, con impacto económico en el sistema o insostenible a largo plazo.

Los límites críticos citados en la bibliografía varían desde 1,5 mPa como límite crítico inferior a partir del cual el crecimiento disminuye en un 50% y como límite crítico superior 3 mPa a partir del cual el crecimiento radical cesa en el cultivo de maíz (Boone et al., citados por Álvarez et al., 2006). Estos límites varían con el tipo de suelo y especie sembrada.

2.3.3 Densidad aparente y porosidad

La densidad aparente es la relación que existe entre el peso seco (105°C) de una muestra de suelo, y el volumen que esa muestra ocupaba en el suelo (García et al., 2004). Al ser una relación entre el peso seco de la muestra y el

volumen de sólidos de la muestra más el volumen poroso, se puede decir que un aumento en la misma significa una disminución del espacio poroso afectando así la aireación, movimiento y retención de agua, así como también la dinámica de algunos nutrientes en el suelo.

Dentro del espacio poroso se pueden distinguir macroporos y microporos. Los primeros no retienen el agua contra la fuerza de la gravedad, y por lo tanto son los responsables del drenaje y la aireación del suelo, constituyendo además, el principal espacio en el que se desarrollan las raíces. Los segundos son los que retienen agua, parte de la cual es disponible para las plantas. Las características del espacio poroso, dependen de la textura y la estructura del suelo (García et al., 2004). La compactación actúa reduciendo los macroporos en detrimento de los microporos proporcionalmente dentro de la porosidad total, viéndose ésta disminuida.

Todo esto actúa muchas veces reduciendo la productividad de los suelos compactados en comparación con suelos que presentan buena estructura, encontrándose en ocasiones impacto significativo en el rendimiento.

La compactación del suelo, debido al colapso o disminución de los espacios de poros, es de las causas más comunes de restricción física para el crecimiento y desarrollo de las raíces. Una vez que los poros han sido compactados hasta 0,2 - 0,3 mm de diámetro, es difícil que las raíces de los cultivos puedan penetrar libremente en el suelo (FAO, s.f.).

En relación a esto, Singh et al. (2015) señalan que una propiedad física del suelo que generalmente se altera en respuesta a la compactación es la densidad aparente del suelo superficial y sub_superficial. Son varios los autores que han informado que la compactación incrementa la densidad aparente al interrumpir los agregados del suelo o por compresión de dichos agregados formándose así una capa restrictiva (Patel y Singh, Ankeny et al., Badalikova y Hruby, Radford et al., citados por Singh et al., 2015).

Daddow y Warrington (1983), establecieron que 1,65 Mg.m⁻³ es el umbral de densidad aparente para permitir el crecimiento radicular.

2.3.4 Dinámica del agua en el suelo

Como se mencionó anteriormente la dinámica del agua en el suelo depende de la porosidad de este, donde el movimiento dentro del perfil se produce a través de los macroporos y la retención para la disponibilidad de las plantas se da en los microporos.

El trabajo de Hill y Sumner, citados por Horton et al. (1994) explica que la influencia característica de la compactación en la curva de retención de agua

se basa en tres efectos combinados: (1) prominencia de los poros grandes; (2) distribución de poros más pequeños; (3) reducción general en el volumen de poros causada por la compactación.

La tasa a la cual se infiltra el agua de lluvia en el suelo está influenciada por su abundancia, la estabilidad y tamaño de los poros en la superficie del suelo, su contenido de agua y la continuidad de los poros de transmisión hacia la zona radical. Hill et al., citados por Horton et al. (1994) afirman la contribución a la retención y el transporte del agua, del tamaño, forma, continuidad y tortuosidad de los poros en el suelo estructurado. Una reducción del tamaño de los mismos reduce enormemente la velocidad de infiltración de la lluvia. Si un poro se reduce diez veces de tamaño, la cantidad de agua que puede fluir a través del mismo en un tiempo dado será 10.000 veces menor que antes de ser reducido. Esto destaca el efecto perjudicial de la compactación sobre la tasa de infiltración del agua de lluvia (FAO, s.f.).

La compactación influye significativamente en las propiedades hidráulicas del suelo, como la infiltración, la retención y el flujo de agua del suelo, y la respuesta hidrológica (Klute, Onstad y Voorhees, citados por Horton et al., 1994).

La tasa de infiltración de agua en el suelo se puede usar para monitorear el estado de compactación, especialmente de la capa superficial. El agua se infiltra en suelos no compactados que tienen partículas bien agregadas mucho más rápido que los suelos masivos y sin estructuras (Hamza y Anderson, 2005).

Álvarez et al. (2009), encontraron en los tratamientos bajo siembra directa, bajas tasas de infiltración. Esto estuvo asociado con la presencia de estructuras laminares en el horizonte A, lo cual limita la entrada de agua a los suelos manejados bajo este sistema de labranza. Otros autores reportan resultados similares relacionando este efecto a un fenómeno al cual denominan horizontalización del espacio macroporoso superficial, hablan de un “hojaldrado” del suelo en superficie (Sasal et al. 2006, Álvarez et al. 2009).

No obstante, existen otros casos en los que se reportó una tasa de infiltración mayor en siembra directa (Gómez et al. 1999, Azooz y Arshad 2001, Strudley et al. 2008). Siendo el impacto de la compactación sobre este parámetro algo confuso.

Un parámetro físico del suelo que interviene en todos aquellos procesos relacionados con el movimiento de agua y solutos a través del mismo es la conductividad hidráulica saturada.

Este parámetro es especialmente sensible a la compactación del suelo causada por el tráfico de campo. El efecto de la compactación en el flujo de

agua en el suelo tiene muchas influencias indirectas e importantes sobre el enraizamiento y crecimiento de plantas, como el estado de aireación, la resistencia mecánica del suelo al enraizamiento, la extensión de la raíz y la absorción del agua y los nutrientes de las plantas.

Radford et al. (1999) indican que la reducción de la conductividad hidráulica, puede limitar el almacenamiento de agua en el suelo y, el crecimiento y rendimiento del cultivo. Las reducciones en la emergencia de las plántulas, si resultan en poblaciones subóptimas, pueden limitar la capacidad de un cultivo para hacer pleno uso de la luz, agua y nutrientes disponibles.

Las propiedades del agua del suelo se pueden estimar, al menos en general, a partir del conocimiento de las propiedades físicas del suelo. Clapp y Hornberger (1978), Gupta y Larson (1979), Saxton et al. (1986), Horton et al. (1994), entre otros autores, han informado ecuaciones empíricas usando textura y densidad aparente para estimar la retención de agua del suelo y la conductividad hidráulica.

Entre las propiedades del suelo afectadas por la compactación y la labranza relacionada, quizás de lo que menos se conoce es sobre propiedades y procesos hidráulicos del suelo a pesar de su importancia (Horton et al., 1994).

2.3.5 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) es la medida de la capacidad de un material para conducir la corriente eléctrica, el valor será más alto cuanto más fácil se mueve la corriente a través del mismo. Es proporcional al número de iones presentes y a su movilidad, por lo que permite estimar el contenido de sales del suelo. Sus valores son orientativos y deben complementarse con determinaciones de profundidad de la napa freática, sistemas de labranza, etc.

La determinación en laboratorio se realiza normalmente en extracto de saturación a 25°C y se expresa como dS m⁻¹ (deci-Siemens por metro) (Quiroga y Bono, 2012). La misma está influenciada por una combinación de propiedades fisicoquímicas que incluyen sales solubles, contenido de arcilla y mineralogía, contenido de agua en el suelo, densidad aparente, materia orgánica y temperatura del suelo; en consecuencia, se han utilizado medidas de CE en las escalas de campo para mapear la variación espacial de varias propiedades edáficas: salinidad del suelo, contenido de arcilla o profundidad a capas ricas en arcilla, contenido de agua del suelo, profundidad de arenas depositadas por inundación y materia orgánica. Se comenzó a utilizar en la agricultura, en primer lugar para medir la salinidad del suelo. Es una medida de

suelo rápida, confiable y fácil de tomar que a menudo, pero no siempre, se relaciona con el rendimiento de los cultivos (Corwin y Lesch, 2003).

2.4 EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN LOS CULTIVOS

Cuando se practica el sistema de siembra directa, el crecimiento deficiente en etapas vegetativas, resultante de la dureza del suelo, puede ser un factor importante que limita la capacidad de los cultivos de utilizar completamente la humedad del suelo a profundidad durante la fase crítica de concreción de rendimiento (Mead y Chan, citados por Díaz Zorita, 2000).

Stirzaker et al., citados por Sadras et al. (2005) encontraron reducciones en el crecimiento vegetativo de los cultivos bajo siembra directa en comparación con los cultivados en suelo laboreado convencionalmente. Como los cultivos fueron totalmente irrigados y fertilizados, atribuyeron estas diferencias a señales de raíz inhibitorias asociadas con una mayor densidad aparente en el suelo bajo siembra directa.

Son varios los autores que afirman que el crecimiento inhibido de las plantas se atribuye principalmente a la reducción del volumen de raíces (Iijima y Kono, Yamauchi, Grzesiak et al., Masle, Fageria et al., citados por Grzesiak et al., 2013). Una señal hormonal de las raíces es la causa de la reducción en el crecimiento de los brotes en los suelos compactados (Else et al., 2009). A su vez, el grado de restricción del crecimiento de las raíces en el suelo compacto depende de la especie y la edad de las plantas.

La compactación del suelo tiene el potencial de alterar la morfología y la fisiología de las plantas (Bingham y Passioura, citados por Sadras et al., 2005), y reducir el crecimiento y el rendimiento. Se han reportado reducciones en el rendimiento de grano atribuibles a una alta impedancia mecánica del suelo para varios cultivos en una amplia gama de suelos de arenas a arcillas pesadas (Barber y Díaz 1992, Arvidsson y Hakansson 1996, Ishaq et al. 2001, Radford et al. 2000, Dauda y Samari 2002, Montavalli et al. 2003, Sadras et al. 2005). Por su lado Sadras et al. (2005) encontraron que el crecimiento y longitud de las raíces de trigo en el suelo compacto se redujo, reflejando el cambio en la morfología de las raíces con la compactación.

Grzesiak (2009) demuestra que los tratamientos de compactación del suelo disminuyeron el número de hojas, el área foliar y la materia seca de los brotes y las raíces. Bingham y Passioura, citados por Sadras et al. (2005) encontraron resultados similares donde relacionaron la reducción en el crecimiento de los brotes de las plantas en suelos compactados con la

conductancia estomática reducida, una disminución en la tasa de división y expansión celular, y menor aparición de hojas.

Punyawardena y Yapa, citados por Singh et al. (2015), encontraron que el aumento en la compactación disminuyó el crecimiento de raíz, la absorción de K, la altura de la planta y el peso de grano del maíz. La presencia de la capa compactada del subsuelo afecta la cantidad y distribución de raíces (Sidhu, Sur et al., Sur y Sidhu, citados por Singh et al., 2015) concentrando las mismas en la capa superficial.

Además de estos efectos directos de la compactación del suelo sobre el crecimiento de las plantas, existen efectos indirectos que son agrónomicamente relevantes. Por ejemplo, la compactación del suelo puede aumentar la incidencia de enfermedades radicales (Roget et al., Gill et al., Watt et al., citados por Sadras et al., 2005) y muchos componentes de la dinámica del nitrógeno en el suelo, incluyendo las tasas de mineralización de nitrógeno y desnitrificación (Lipiec y Stepniewski, Breland y Hansen, citados por Sadras et al., 2005).

Sadras et al. (2005), demostraron también mediante un estudio que la disponibilidad de agua, tal como se caracteriza con el límite inferior de agua disponible de la planta, podría explicar parcialmente el efecto de la compactación del suelo y la labranza profunda sobre el crecimiento de los cultivos y la evapotranspiración. En un estudio de 7 años, el aumento de la disponibilidad de agua en el suelo representó el 53% de la respuesta de rendimiento a la labranza profunda en cultivos de soja en Bolivia, sin respuesta de rendimiento en temporadas de lluvias altas (Barber y Díaz, 1992).

Los cambios relativos en los componentes de la evapotranspiración de los cultivos con el aumento de la compactación del suelo son consecuencia de la marcada sensibilidad de la expansión foliar a la impedancia mecánica del suelo (Passioura, citado por Sadras et al., 2005).

Sadras et al. (2005), señalan para trigo, que la compactación del suelo redujo drásticamente la interceptación de la radiación fotosintéticamente activa del dosel y no tuvo ningún efecto medible sobre la eficiencia de uso de la radiación. De la misma manera, la compactación redujo la transpiración sin cambio en la eficiencia de la misma.

El maíz es uno de los cultivos más sensibles al déficit hídrico, debido a su acotado período crítico en momentos de alta demanda atmosférica (Sadras y Calviño, citados por Álvarez et al., 2006). Las raíces de maíz responden negativamente a la presencia de capas compactas en el subsuelo, pero no siempre con impacto sobre los rendimientos (Erbach et al. 1986, Logsdon et al. 1999, Díaz Zorita 2000). Con relación a esto Díaz Zorita (2000), sostiene que el efecto de la compactación sobre los rendimientos de los cultivos depende de las

condiciones climáticas que interactúan con las propiedades del suelo (Lowery y Schuler 1994, Vepraskas, citado por Díaz Zorita 2000).

A pesar de los efectos, directos e indirectos antes mencionados, causados por la compactación en los cultivos, no siempre se encuentra respuesta en rendimiento, por lo que tiene cabida la mención de Taylor y Brar (1991) de que, aunque el desarrollo radicular sea alterado por cambios en la compactación del suelo, el crecimiento por encima del mismo puede ser normal si la planta es capaz de obtener agua y nutrientes suficientes.

2.5 MEDIDAS PARA REDUCIR EL IMPACTO DE LA COMPACTACIÓN EN EL SISTEMA

En referencia a mitigar el problema generado por la compactación del suelo, se cree que una única medida no es capaz de solucionar dicho problema en el largo plazo, sino que debería ir acompañada de cambios en las prácticas o procesos causantes.

2.5.1 Descompactación biológica

Uno de los métodos utilizados para restaurar propiedades físicas de suelos compactados, considerado de bajo costo en cuanto a sus beneficios generados en el sistema, es utilizar las raíces de ciertas especies con habilidad de desarrollarse y explorar suelos que presentan alta impedancia para el crecimiento de especies más susceptibles. Dichas especies actuarían como subsoladores biológicos, creando canales cuya estabilidad será mayor que aquella de canales formados por métodos mecánicos, ya que la liberación de sustancias orgánicas de las raíces estabiliza las superficies internas de estos. La alta estabilidad de los canales de las raíces se relacionaría con su orientación predominantemente vertical, lo cual los protegería del eventual sellado debido a fuerzas compactivas que también son verticales (Martino, 2001). Una vez que las raíces se han muerto y contraído, estos poros serán lo suficientemente grandes y estables para permitir que penetren las raíces del cultivo siguiente (FAO, s.f.). Dexter (1991), propuso el término “laboreo biológico” para denominar a este proceso, incluyendo también a la acción de organismos del suelo como las lombrices e insectos.

Martino (2001), señala que el proceso de laboreo biológico es sin dudas muy positivo en cuanto a la mejora en la capacidad de infiltración de agua, en el intercambio de gases entre suelo y atmósfera y en la penetrabilidad por las raíces. Además agrega que lograr altas productividades en suelos altamente

compactados, mediante este proceso, están aún lejos de ser demostrados, y son motivo de diversas especulaciones.

Monroe y Kladvko, citados por Hamza y Anderson (2005), hacen mención a que efecto de las raíces en la estructura del suelo depende de la especie cultivada, la constitución del suelo y los factores ambientales.

Gerster et al. (2010), manifiestan que las gramíneas como maíz, sorgo y trigo presentan una mayor capacidad de exploración radical que el cultivo de soja y se atribuye a estos cultivos la capacidad de recuperar porosidad en los suelos, reduciendo impedancias mecánicas generadas por el tránsito. En un experimento encontró, en secuencias que incluyeron gramíneas, una reducción de la resistencia a la penetración (R_p) entre 15 y 24%, por debajo de los 25cm de profundidad, comparado con el monocultivo de soja (R_p , 2000kPa). Esto se reflejó en un aumento del 10% en el rendimiento del cultivo de soja dentro de la secuencia que incluían gramíneas.

Álvarez (2013), indica que la presencia de raíces en forma continua durante todo el año en el doble cultivo trigo/soja de 2da. aumentó la proporción de agregación granular, en suelos limosos con arcillas poco expansibles. Sin embargo, este tipo de mecanismo de agregación no persiste en el tiempo, por lo que se sugiere como alternativa muy valiosa la incorporación de cultivo cobertura (CC) que cumplan con la función de mantener una actividad radicular, y a su vez, al no ser cosechados, el tránsito es menor que en el caso del doble cultivo productivo. Se ha demostrado que los CC reducen la compactación del suelo e incrementan la macroporosidad, facilitando la infiltración y la aireación del suelo. Además, en caso de una limitante estructural ya instalada, si las raíces de los CC son capaces de atravesar las capas compactas, podrían constituir una alternativa de corto plazo para regenerar la estructura sin recurrir a la remoción del suelo.

Dejando atrás un sistema de agricultura continua, una de las soluciones que parece más eficiente en la mejora de las propiedades físicas y químicas del suelo, es la inclusión de pasturas dentro de la rotación, lográndose así un mayor efecto benéfico, a través de una mayor producción radicular (en cantidad y profundidad), alternando muerte y crecimiento de estas, más cantidad de exudados, y aportes de nutrientes al sistema. Obteniendo un mejor resultado en cuanto a estructura y calidad del suelo, con efecto más prolongado en comparación con cultivos coberturas. En relación a esto García, citado por Sawchik (2004), asevera que, en general en los casos de rotaciones cultivo-pastura es esperable una mejora en las propiedades físicas en la etapa de pasturas, que está asociada a la producción de materia seca durante ese período (calidad y cantidad de rastrojo), explicado fundamentalmente por el componente gramíneas.

Martino (2001), menciona que resultados preliminares obtenidos en La Estanzuela han demostrado que la alfalfa y la achicoria desarrollaron sistemas de biocanales más profundos que los de festuca, trébol rojo y trébol blanco. Ello ha resultado en una mayor capacidad de infiltración de agua. Además agrega que varias especies vegetales, de diferentes ciclos, han sido reportadas como adecuadas para este propósito: alfalfa, colza, trébol de olor y lupino.

Además de la utilización de plantas con capacidad de descompactar y/o mejorar las propiedades físico-químicas del suelo, existen otras alternativas que son utilizadas con el mismo propósito, las cuales se utilizan para promover un aumento de la materia orgánica del suelo, a través de la retención de rastrojos, el estiércol o la adición de materia orgánica vegetal o animal de fuentes externas (Hamza y Anderson, 2005). Esto conlleva a los beneficios relacionados con la materia orgánica, descritos en el capítulo de materia orgánica.

2.5.2 Medidas asociadas a la maquinaria

Como se mencionó en el capítulo nombrado como maquinaria agrícola como agente causal de la compactación del suelo, las características asociadas a la maquinaria que generan un impacto negativo en las propiedades físicas del suelo son la presión de inflado de los neumáticos, la carga por eje y el número de pasadas en el tráfico. Se propone atenuar el impacto, modificando cada variable.

En cuanto a la presión de inflado, debe ser siempre la más baja permitida en las diferentes situaciones (capacidad de carga del neumático, velocidad, tracción). La distribución de presión en el área de contacto neumático-suelo debe ser uniforme, por lo tanto, el neumático debe adaptarse a las propiedades del suelo (Alakukku et al., 2003). Una de las medidas señaladas por el autor es el uso de neumáticos radiales, los cuales son más flexibles, lo que aumenta el área de contacto, especialmente sobre una superficie firme, reduciendo de este modo la presión media de contacto con el suelo.

Con relación a la carga por eje se puede reducir dividiendo la carga total entre dos o más ejes en lugar de uno. Los ejes/ruedas deben estar espaciados para evitar cualquier interacción entre ellos como lo describe Olsen, citado por Alakukku et al. (2003). En este caso, las áreas de contacto de las ruedas adicionales actuarán como áreas de contacto separadas y menores con una compensación de tensión mejorada. Sin embargo, los efectos de múltiples pasadas pueden reducir la ventaja de varios ejes.

Para que el impacto del número de pasadas sea menor, el tráfico controlado sería una opción que mantendría una zona más favorable para el crecimiento de las plantas restringiendo la compactación del suelo a las vías de circulación (Braunack et al., citados por Hamza y Anderson, 2005). Por lo que se generan zonas de compactación, que podrían ser tratados de forma independientes, reduciendo así los costos en caso de ser descompactados mecánicamente. Otra alternativa, complementaria o no de la anterior, es utilizar unidades que realizan varias operaciones simultáneamente (Aliev, 2001).

Es necesario destacar que de nada serviría aplicar las diferentes medidas, si las operaciones se realizaran con un alto contenido de humedad en el suelo, por lo que trae aparejado.

2.5.3 Descompactación mecánica

La compactación del suelo en los sistemas agrícolas que no rotan con pasturas, ha despertado mayor interés por el uso de herramientas de laboreo vertical en profundidad, para subsanar el efecto de capas compactadas, que afectan la productividad. Como en el presente trabajo se utiliza el paraplow, se hará mención de esta herramienta en particular.

El paraplow, una herramienta de subsolado desarrollada en Inglaterra, puede ser utilizado para aflojar suelos compactados hasta una profundidad de 50 cm, con muy escasa disturbación de la superficie. Por lo tanto, es una herramienta que puede ser utilizada en sistemas de siembra directa (Martino, 2001).

Haciendo énfasis en la resistencia a la penetración, Martino (2001), comenta que la mayoría de los reportes demuestran una reducción en este parámetro en los suelos, atribuible al paraplow (Braum et al. 1984, Touchton et al. 1989, Martino 1998).

Braum et al. (1984) determinaron que el paraplow fue efectivo en reducir la RP hasta 35 cm de profundidad. Inmediatamente luego de pasado el Paraplow, la RP fue de 0,3 mPa comparado con 1,2 mPa para el suelo indisturbado. Siete meses más tarde, ambos tratamientos tenían una RP de 0,6 y 1,1 mPa, respectivamente.

Álvarez et al. (2009) indican que la RP fue muy sensible a la práctica de descompactación, mostrando una importante reducción a la siembra en los suelos descompactados. La Rp se redujo en promedio el 40% de 0-20cm y 20% 20-40cm por la descompactación, manteniéndose este efecto hasta la cosecha del maíz.

Otra manera de visualizar los efectos de la descompactación sobre la R_p es mediante la modificación del umbral de R_p que limitaría el crecimiento radicular en profundidad. Hodgson et al., citados por Martino (2001) determinaron que el paraplow incrementó la máxima profundidad de enraizamiento, medida como la profundidad a la cual la R_p alcanzaba un valor de 2 MPa, de 23 a 32 cm. Varios autores han reportados que el máximo aflojamiento, utilizando el paraplow, ha sido usualmente observado entre 20 y 35 cm de profundidad (Braim et al. 1984, Martino 1998, Busscher et al., Ehlers y Baeumer, Hipps y Hodgson, citados por Martino 2001).

Braim et al. (1984), Martino (1998), Busscher et al., Ehlers y Baeumer, Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001) demostraron para trigo, cebada y maíz un notorio efecto del paraplow en la promoción del desarrollo de raíces debido a una reducida R_p .

Como se destacó con anterioridad, el pasaje del paraplow también modifica otras propiedades del suelo como los son, la infiltración de agua, porosidad, y densidad aparente, dichos efectos se discuten a continuación.

Como fue mostrado por Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001), el incremento en la macroporosidad y la continuidad del sistema poroso, por el pasaje del paraplow, serían las principales causas del aumento en la capacidad de infiltración.

Mukhtar et al. (1985) estudiaron el efecto de varios sistemas de laboreo sobre la infiltración de agua en cuatro suelos a lo largo de una estación de cultivo. Promediando todos los sitios y fechas de muestreo, la infiltración acumulada fue un 67% mayor para los tratamientos con paraplow comparado con los que tuvieron siembra directa.

Los estudios realizados en Uruguay (Martino, 1998) también demostraron que uno de los principales efectos del paraplow fue el incremento en la capacidad de infiltración de los suelos, lo cual mejora la captación de agua de lluvias intensas de primavera y verano.

Resultados similares fueron encontrados por Álvarez et al. (2006), indicando una mejora en la infiltración en todos los sitios evaluados, y un mayor crecimiento radical en algunos de ellos. Ambas propiedades favorecerían la economía del agua por parte del cultivo debido al aumento de captación o ingreso de agua al perfil, y una mayor exploración radical, que permite el acceso a más recursos.

Cerisola et al. (2014), por su parte, hallaron que la labranza profunda redujo el tamaño de los bloques estructurales y generó cambios en la orientación de los mismos, incrementando la infiltración al aumentar el volumen de los macroporos, que forman parte de la fracción estructural de la porosidad.

Esto concuerda con Hipps y Hodgson, citados por Cerisola et al. (2014) los cuales, reportaron un incremento de 7,8 a 13,3% en el volumen de poros mayores a 60 μm en un suelo franco areno-arcilloso causado por el pasaje del paraplow.

En Uruguay, sobre suelos franco limo-arcillosos, el paraplow pasado a 45 cm de profundidad también disminuyó significativamente la densidad aparente, particularmente en la capa superior del horizonte Bt, efecto que tuvo una residualidad de hasta más de dos años (Martino, 2001).

Braim et al. (1984) demostraron que los efectos principales de los tratamientos con paraplow, fue aumentar significativamente el crecimiento de las raíces a profundidades de 5 y 40 cm. Conjuntamente con esto se observó que la disponibilidad de nutrientes para las plantas también se veía aumentada por la acción del paraplow. Braim et al. (1984) detectaron una mayor absorción de N por plantas de cebada en parcelas subsoladas que en las no disturbadas. Efecto que también fue comprobado por Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001), y mencionan que puede haber estado asociado con el hecho de que, como ya fue indicado previamente, el paraplow mejora la aireación del suelo y la infiltración de agua en el mismo, promoviendo eventualmente una mayor mineralización de la materia orgánica. Otro estudio que demostró el mismo efecto fue el de Ide et al. (1984) en el cual se incrementó la absorción de P y K debido al paraplow, lo cual se atribuyó a una más eficiente exploración del suelo por las raíces.

Haciendo alusión al impacto en el rendimiento, varios trabajos señalan aumentos significativos en el mismo de, 6,5% o 785 kg/ha para el cultivo de maíz (Álvarez et al., 2006), 6,2% equivalente a 754 kg/ha para maíz también (Álvarez, 2013), 14% para maíz, en suelos pobremente drenados (Erbach et al., citados por Martino, 2001).

En Uruguay, Martino (2001) menciona que las respuestas en el rendimiento de los cultivos al uso del paraplow en Uruguay han sido notoriamente mayores que las encontradas en la literatura. Este implemento causó aumento de la productividad de los cultivos en 11 de 14 experimentos, con una magnitud de 102, 36, 29 y 14 % en maíz, girasol, cebada y trigo, respectivamente (Martino, 1998). Agrega a esto, que las causas de estos aumentos en la productividad han sido un mejor establecimiento de maíz, cebada y trigo, mayor proliferación de raíces en los cuatro cultivos, mejor control de malezas en maíz, y un mayor número de granos por unidad de superficie en trigo y cebada, debido principalmente a mayor sobrevivencia de macollos y menor mortandad de espiguillas. Una pasada de paraplow aumentó la productividad global de los tres cultivos subsiguientes en 25 a 53 %, con respecto al suelo sin subsolar. El subsolado practicado previo a cada cultivo no produjo ventajas significativas comparado con una pasada cada tres cultivos. El

mismo autor con respecto al aumento de la población, encontró un marcado efecto positivo del paraplow, sobre plantas de maíz (56%), cebada (22%) y trigo (14%), debido principalmente a la mayor temperatura y a un mejor drenaje del suelo.

Sin embargo, existe otra cantidad de estudios en los que la respuesta es confusa o no se diferenció entre tratamientos. Muchos señalan que la respuesta está asociada al tipo de suelo y sobre todo a las condiciones climáticas que imperen en la estación de crecimiento de los cultivos (Varsa et al. 1997, Scotta y Herrera, Ripoll y Kruger, Sene et al., citados por Díaz Zorita 2000, Sadras et al. 2005, Álvarez et al. 2006).

Otro de los efectos buscados de la descompactación mecánica, debido a sus altos costos, es la residualidad del mismo. Esto depende en gran medida de la menor capacidad portante o vulnerabilidad en la que queda el suelo, además del manejo realizado post labor, pudiendo producirse recompactación. Este proceso se produce a través de la precipitación de partículas finas de arcilla y coloides del suelo, transportado por agua a través del perfil principalmente por precipitaciones (Busscher et al., 2002). Para evitar que esto suceda, es necesario un agente aglutinante o floculante, como por ejemplo, yeso o materia orgánica (Hamza y Anderson, 2005). Mediante diferentes experimentos, se ha encontrado una repuesta variable, por ejemplo Moffat y Boswell (1996), indican un año de residualidad. Por otro lado, Hall et al. (1994), mencionan que los aumentos de rendimiento asociado a la descompactación no duraron más allá del segundo año. Hamza y Anderson (2005) indican que el aumento en la tasa de infiltración persistió hasta el tercer año.

Con el objetivo de ampliar la información sobre la descompactación mecánica en diferentes escenarios, se plantearon diferentes hipótesis.

1. A través de la resistencia a la penetración se pueden identificar zonas con diferente nivel de compactación y diferente respuesta al pasaje de paraplow.
2. El pasaje de paraplow mejora las propiedades físico-químicas del suelo, traduciéndose esto en un aumento del rendimiento del cultivo.
3. Los efectos de la descompactación perduran más de un ciclo de cultivo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

El trabajo se realizó en el establecimiento “El Atalaya”, ubicado en el noroeste del departamento de Soriano, Uruguay (33°25'33.31"S; 57°58'52.32"O), en el período comprendido entre: diciembre (2016) y junio (2017).

El clima de la zona es templado, presenta un régimen hídrico con un promedio histórico de 1130 mm anuales (1961-1990), la temperatura media anual es de 17,4°C¹, caracterizando un ambiente libre de heladas de 180 días.²

El potrero utilizado estuvo durante 15 años en agricultura continua sin labranza. La secuencia de cultivos en el área experimental a partir del invierno de 2015 fue cereal/soja - barbecho/soja - cebada/maíz. El presente estudio refiere al cultivo de maíz dentro de la secuencia.

El paisaje presenta un relieve levemente ondulado con pendientes de alrededor de 2.5%. El suelo fue clasificado como Brunosol Subeutrico Lúvico Ar, h de acuerdo a la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay. Se encuentra ubicado sobre la unidad de suelo de Cuchilla Corralito (escala 1:1.000.000), formación Fray Bentos, grupo de suelos CONEAT 11.4 (MGAP. RENARE. CONEAT, 2016).

3.2 TRATAMIENTOS

Se evaluaron dos tratamientos: (1) descompactado (D) y (2) siembra directa (SD). El primero corresponde al pasaje de una herramienta de labranza profunda utilizando un paraplow, a una profundidad máxima de 0,40m; el segundo corresponde a siembra directa continua. Los tratamientos D se aplicaron en el otoño de tres años diferentes (2014, 2015 y 2016), haciendo referencia como “efecto año”, al momento en que tuvo lugar el pasaje del paraplow. En este trabajo se evalúa la repuesta en propiedades del suelo y en el cultivo de maíz que corresponde a zafra 2016-2017, sembrado el 30 de noviembre del 2016. Por tanto, se cuantifica la respuesta como efecto residual

¹ INUMET (Instituto Uruguayo de Meteorología, UY). 2016. Datos meteorológicos (sin publicar).

² INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria, UY). 2016. Datos meteorológicos (sin publicar).

luego de dos años (Residual2), luego de un año (Residual1) y el efecto directo (Directo).

3.3 DISEÑO EXPERIMENTAL

Los tratamientos D y SD se instalaron en parcelas apareadas con 3 repeticiones en tres años consecutivos. El tratamiento “D” se realizó para cada año mencionado. La unidad experimental fue de 300m de largo por 30m de ancho, de manera de abarcar la diversidad edáfica existente (Figura No.1). Los resultados se analizaron utilizando un diseño anidado dentro de año de aplicación de los tratamientos.



Figura No. 1. Mapa de diseño del ensayo y grilla de muestreo

Para el estudio de las medias de los tratamientos de las diferentes variables se utilizó la prueba Tukey ($P \leq 0.05$), considerando como tendencia cuando $P \leq 0.10$. Los resultados de los análisis se obtuvieron utilizando el programa estadístico INFOSTAT.

3.4 MANEJO DEL CULTIVO

En el Cuadro No. 1 se resume el manejo agronómico realizado durante el ciclo del cultivo de maíz, información que fue suministrada por la empresa encargada de la producción.

Cuadro No. 1. Manejo del cultivo

Fecha de siembra	30/11/2016
Cultivo	Maíz 2 ^a . (secano)
Cultivar	PW 505
Fertilización Basal 1	Sin fertilizante
kg/ha 1	—
Fertilización Basal 2	Sin fertilizante
kg/ha 2	—
Refertilización	SOLMIX (28 N + 5S)
kg/ha	366

3.5 MUESTREOS

Cada parcela fue dividida en una grilla georreferenciada de 30*20 m, en el centro de la cual se realizaron todos los muestreos de suelo y del cultivo.

3.5.1 Determinaciones en suelo

Conductividad eléctrica aparente ($s.s^{-1}$): se determinó el día 7/12/2016 con un conductivímetro portátil, registrando el promedio de dos lecturas por sitio a dos profundidades: 20 y 40cm.

Resistencia mecánica a la penetración ($kPa\ cm^{-2}$): se determinó también el día 7/12/2016 con un penetrómetro marca Rimik CP20, registrándose de manera automática cada 2 cm entre de 0 a 40 cm de profundidad. En cada punto de cada faja, se realizaron dos determinaciones. Posteriormente al análisis estadístico, estos datos fueron agrupados de 4-10cm y de 12-40cm, debido a que en el primer estrato no se diferenciaron tres zonas de compactación, sino que solo se diferenciaron dos. En el segundo estrato, si se diferenciaron tres zonas, las cuales se agruparon en ALTA, MEDIA y BAJA ($>1646\ kPa$, $<1646\ kPa$ y $>1443\ kPa$, $<1443\ kPa$ respectivamente).

3.5.1.1 Muestreos de suelos para análisis químicos

El muestreo se realizó entre los días 11 y 12 de enero del 2017. Se tomó una muestra compuesta por 8 muestras tomadas por celda a dos profundidades, de 0 a 10 y de 10 a 20 cm. Las muestras se secaron a estufa a 40°C durante 48 horas y se molieron a malla de 2 mm. Se determinó el contenido de calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K); porcentaje de carbono (%C), conductividad eléctrica en muestra saturada (μs), fósforo Bray I (ppm P), acidez titulable y pH (pH H_2O y pH KCl).

3.5.2 Determinaciones en el cultivo

El 11 de enero de 2017, con el cultivo en estado de 6 hojas desarrolladas (V6) se contabilizó el número de plantas logradas en 10m lineales (en cada punto de cada faja).

Se determinó el índice de verde en 10 plantas consecutivas por punto utilizando un medidor de clorofila SPAD Minolta. Una vez finalizado el muestreo se tomó una muestra de plantas cuyos valores de SPAD abarcaron el rango de medidas registrado. Las muestras se secaron a estufa a 60°C, se molieron y se cuantificó concentración de nitrógeno por método Kjeldahl. Se ajustó una regresión lineal entre ambas variable. Con la función estimada ($N \text{ foliar (\%)} = 0,0627\text{SPAD} + 0,4435$) se estimó la concentración de N de todos los sitios.

El 18 de abril se procedió a realizar las determinaciones previas a cosecha. Se midió el largo de mazorca (cm) de diez plantas por punto de muestreo, el número de plantas por metro lineal de la misma forma que en V6, para estimar la población (plantas por m^2) a cosecha. Se extrajeron mazorcas representativas del rango de largo de mazorca determinado, se determinó el peso de grano de cada mazorca y su humedad. Se ajustó una regresión lineal entre el rendimiento por mazorca y su longitud ((rendimiento de mazorca (g) = $-68 + 12 \cdot \text{largo (cm)}$)).

La cosecha se realizó el 6 de junio del 2017, utilizando una cosechadora equipada con monitor de rendimiento y GPS, registrándose en una grilla de 10 x 5m. El rendimiento de grano en cada punto de muestreos se estimó utilizando la función “punto más cercano” del programa Arcgis 10.

3.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS

1. Con el objetivo de cuantificar posibles variaciones en las propiedades del suelo en las zonas utilizadas por año, se realizó una descripción del área utilizada para el experimento, comparando los tratamientos SD entre años.

2. Se realizó una ANAVA para la media móvil de estratos de a 10 cm de RP, estableciéndose diferencias significativas para las media móviles agrupadas entre 12 y 40cm.

3. Se analizó la correlación espacial de la resistencia a la penetración del suelo en este estrato utilizando solamente los registros correspondientes a los tratamientos SD. Para ello se utilizó el programa ArcGis10.0, ajustando semivariogramas exponencial y gaussiano. Se ajustó un semivariograma exponencial con una relación umbral/pepita de 15.

4. Se delinearon tres zonas homogéneas dentro de sí y diferente entre ellas en base a esta propiedad, definiéndolas e interpolando valores por kriging ordinario.

5. Se analizó el efecto de los tratamientos anidado en “año de aplicado el tratamiento D”, considerando las zonas de compactación diferencial del suelo como una serie de experimentos.

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA

Para la estación de crecimiento del cultivo en estudio, la cual se detalla en la Figura No. 2, las precipitaciones fueron de un total de 1092 mm, de los cuales aproximadamente 100 mm ocurrieron durante el período de barbecho, 117 mm durante el periodo vegetativo, 240 mm durante el periodo crítico de determinación del rendimiento de grano de maíz (15 días entrón a la floración) y 600 mm de fin del periodo crítico a la fecha de cosecha (Figura No. 2).

Los requerimientos hídricos del cultivo de maíz, son aproximadamente 600 mm durante la estación de crecimiento, de los cuales 300 mm debería estar disponibles durante el periodo crítico (Giménez, 2007). La información suministrada por INIA. GRAS de agua disponible en suelo (AD), para maíz de secano en siembra equivalente a la de este experimento (tardío zafra 2016/17), indica que es probable que el suelo estuviera entre un 70-100% AD en los estados de desarrollo iniciales (siembra – V6), disminuyendo alrededor de 50-60% AD para los estados en torno a floración (periodo crítico), para luego ir adquiriendo valores de 60% y superiores desde dicho estado, hasta fin ciclo. Considerando como suficiente para que el cultivo no este deficitario, de un 40% AD para estados vegetativos y pos periodo crítico, y 60% de AD para el periodo crítico (Giménez, 2007), el cultivo habría presentado un leve déficit solamente a fin del periodo crítico, durante el cual el AD se ubicó en torno a 50-60% (ver Anexo No. 1).

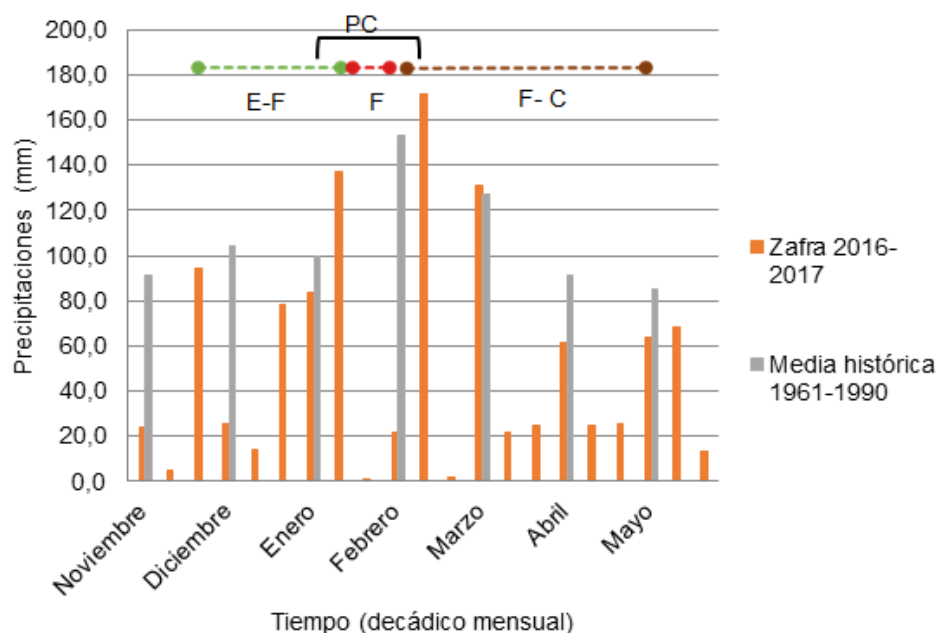


Figura No. 2. Precipitaciones entre noviembre 2016 y junio 2017, en comparación al período 1961 – 1990 y la ubicación temporal de las diferentes etapas del ciclo del cultivo

Fuente: elaborado con base en registros de INIA. GRAS³

El promedio mensual de temperatura para la zona en estudio (Figura No. 3), se ubicó siempre por encima del promedio histórico (sin haber diferencias mayores a 1,5°C), variando entre 18°C y 25°C. Las mayores tasas fotosintéticas para el cultivo se encuentran entre 26 y 32°C (temperaturas de crecimiento), luego el rendimiento se puede ver disminuido con temperaturas superiores a 18-20°C (temperaturas de desarrollo).

Por lo tanto, la temperatura tampoco fue una limitante de importancia para el cultivo en la zafra en estudio, ya que se encontró muy similar a los valores promedios históricos sin presentar extremos que afecten el crecimiento o el desarrollo del mismo.

³ INIA. GRAS (Instituto de Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agro-clima y sistemas de Información, UY). 2018. Datos meteorológicos período 1961-2017 (sin publicar).

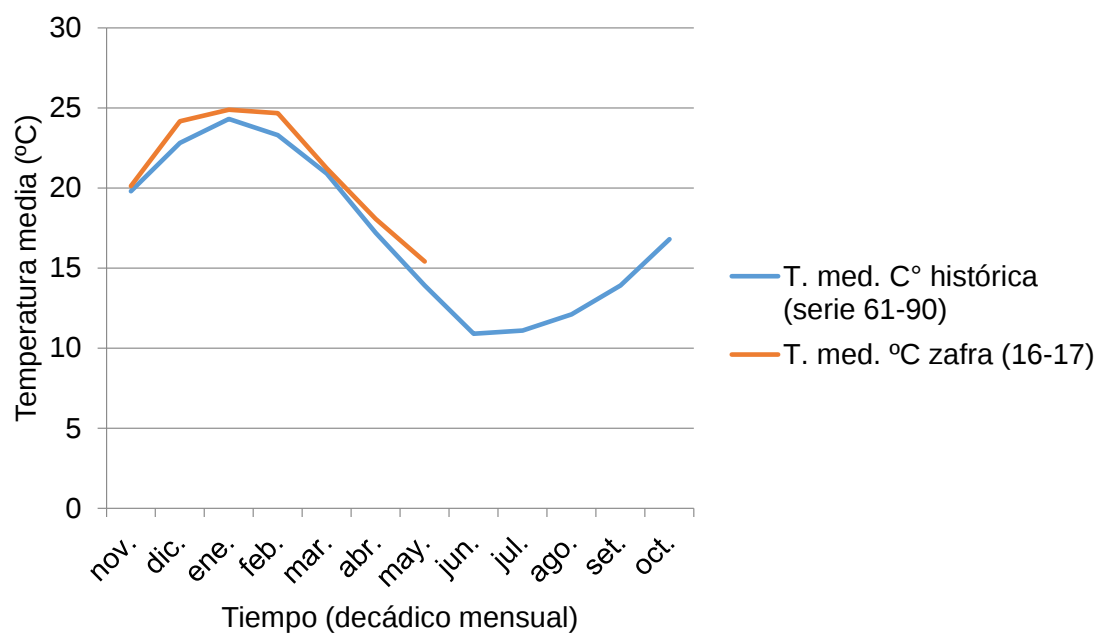


Figura No. 3. Temperatura registrada entre noviembre 2016 y junio 2017 en relación a la serie histórica entre los años 1961 y 1990.

Fuente: elaborado con base en registros de INIA. GRAS³

4.2 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA EXPERIMENTAL. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA

4.2.1 Propiedades químicas

En el Cuadro No. 2 se presenta una caracterización del área experimental utilizada, estratificada por el año de aplicación del tratamiento D.

Cuadro No. 2. Propiedades químicas del suelo para la zona correspondiente a siembra directa (pre tratamiento D) agrupada por el año de realizada la descompactación sub_superficial del suelo (año).

Propiedades	2014	2015	2016
Ca-1* (cmolc kg-1)	17	18	20
Ca-2* (cmolc kg-1)	19	20	21
Mg-1 (cmolc kg-1)	2,02 a	1,67 bc	1,53 c
Mg-2 (cmolc kg-1)	2,04 a	1,53 b	1,52 b
K-1 (cmolc kg-1)	0,66 b	0,69 b	0,80 a
K-2 (cmolc kg-1)	0,61	0,61	0,66
C-1 (%)	3,27	3,29	3,13
C-2 (%)	2,35 ab	2,47 a	2,26 b
$\mu\text{s-1 (s.s}^{-1}\text{)}$	152	158	166
$\mu\text{s-2 (s.s}^{-1}\text{)}$	116	112	127
P-1 (ppm)	35 b	39 ab	44 a
P-2 (ppm)	7	8,5	9
Ac. Titul-1	5,6	5,6	5,2
Ac. Titul-2	4,2	4,2	3,5
pH H2O-1	5,7	5,7	5,7
pH H2O-2	6,0	6,0	6,1
pH KCl-1	4,8	4,8	4,9
pH KCl-2	3,8	5,0	5,4

* 1. Indica profundidad de 0-10cm, 2. profundidad 10-20cm.

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Si bien las propiedades químicas de las zonas utilizadas por cada año (experimento), no difirieron marcadamente entre sí, la correspondiente al año 2016 tuvo menor concentración de carbono orgánico (10-20 cm) y de Mg. Sin existir limitantes en los niveles de los mismos, aunque puede haber diferencias en las relaciones de estos las cuales serán analizadas más adelante.

4.2.2 Propiedades físicas

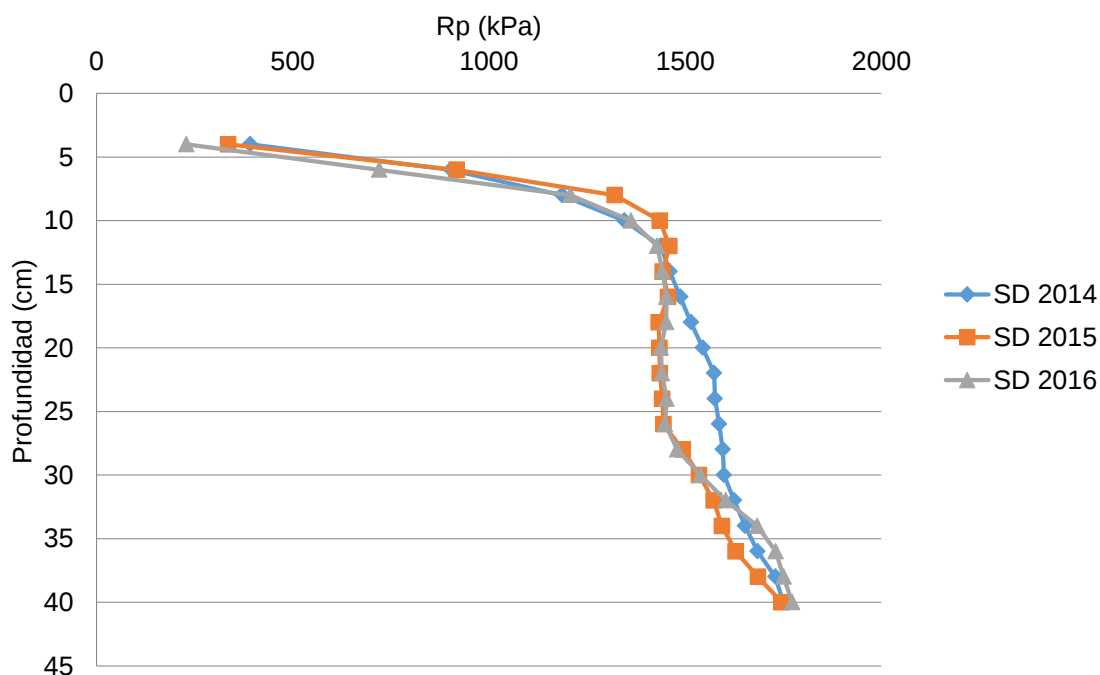


Figura No. 4. Resistencia a la penetración en función de la profundidad de suelo para los tratamientos testigos (SD)

No existieron diferencias significativas en cuanto al perfil de la resistencia a la penetración del suelo entre los testigos correspondientes a cada año (Figura No. 4), por lo que no es de esperar una respuesta diferencial debido a la ubicación espacial de los tratamientos D.

4.2.3 Zonas de compactación diferencial

En la Figura No. 5 se presenta la ubicación espacial de las zonas con compactación sub_superficial en el estrato 12-40cm para los tratamientos SD (pre descompactación). La zona de mayor Rp (ALTA) comprende valores de Rp en un rango de 1646 a 2003 kPa, en la de compactación intermedia (MEDIA) 1443 a 1646 kPa y en la de compactación BAJA 1097 a 1443 kPa.

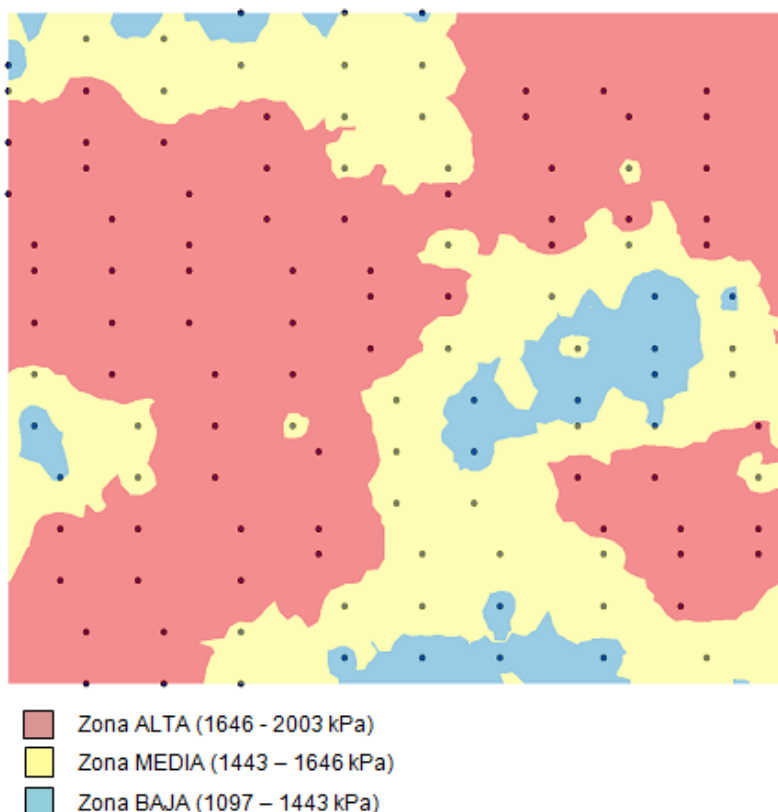


Figura No. 5. Delimitación espacial de la resistencia a la penetración del suelo en el estrato 12-40 cm para los tratamientos siembra directa (SD).

4.3 DESCOMPACTACIÓN MECÁNICA

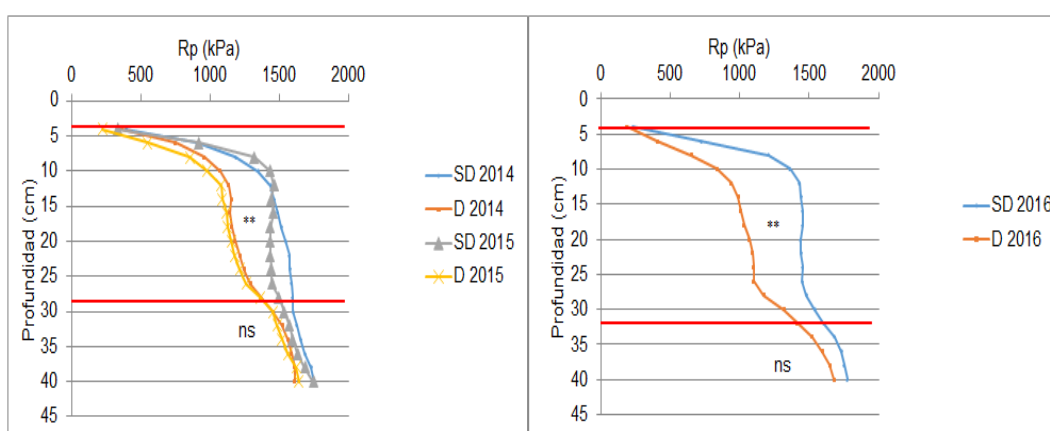
4.3.1 Efecto de la descompactación sub superficial sobre la R_p

El perfil de R_p en los 40cm del perfil del suelo (Figura No. 6) mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre tratamientos en el estrato entre 4 y 28 cm de manera independiente del año en que fue realizada la descompactación. Por tanto, se cuantificó un efecto directo, correspondiente a la respuesta a la descompactación (D) aplicada en el 2016, significando una reducción de la R_p de 25% (360 kPa). A su vez, se constató también un efecto residual del 18% (277 kPa), cuantificado este efecto como la reducción de R_p determinada en el 2016 en respuesta a la descompactación (D) aplicada en el 2014 y 2015. Dentro de este estrato, a partir de los 18 cm de profundidad, se registraron valores muy cercanos o por encima de 1500 kPa, nivel crítico reportado por la

bibliografía a partir del cual se podría reducir de manera creciente hasta un 50% el crecimiento radicular.

Por debajo de los 28cm, y hasta los 32cm, no se encontró diferencias significativas cuantificada como efecto residual, pero sí efecto directo (año 2016), reduciendo la R_p de 1480 kPa a 1172 kPa (20,8%), por efecto del tratamiento.

Por debajo de los 32cm, los valores de R_p tanto para el tratamiento D como para SD, se ubican muy cercano o por encima del nivel crítico de 1500 kPa.

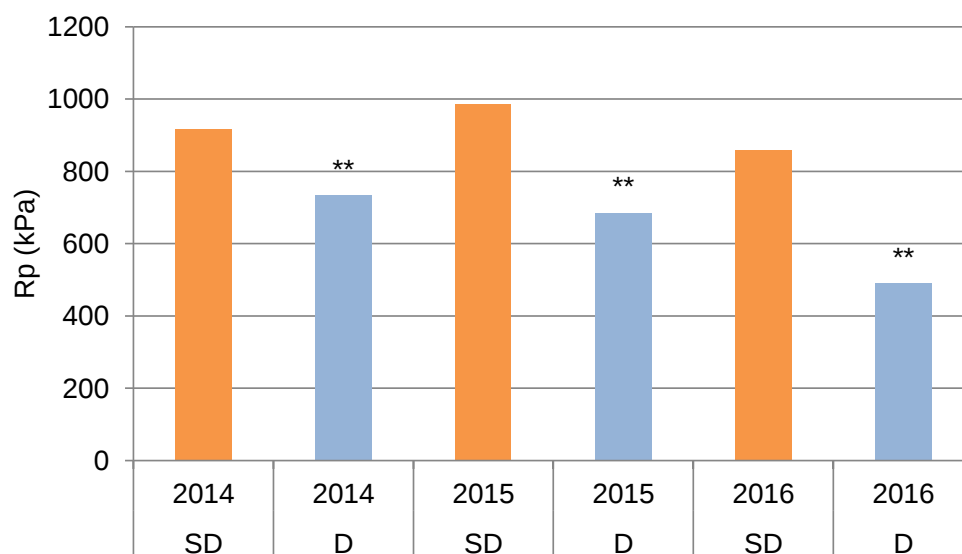


**, Diferente significativamente, ns, no significativo.

Figura No. 6. Perfil de resistencia a la penetración (R_p) en diciembre del 2016 para los tratamientos siembra directa (SD) y descompactado (D) en 2014, 2015 (izquierda) y 2016 (derecha)

En los párrafos subsiguientes se analizarán de forma agrupada la resistencia a la penetración en los estratos que van de 4-10cm y de 12-40cm.

En la Figura No. 7 se presenta el resultado de los valores agrupados de resistencia a la penetración en el estrato de 4-10cm.



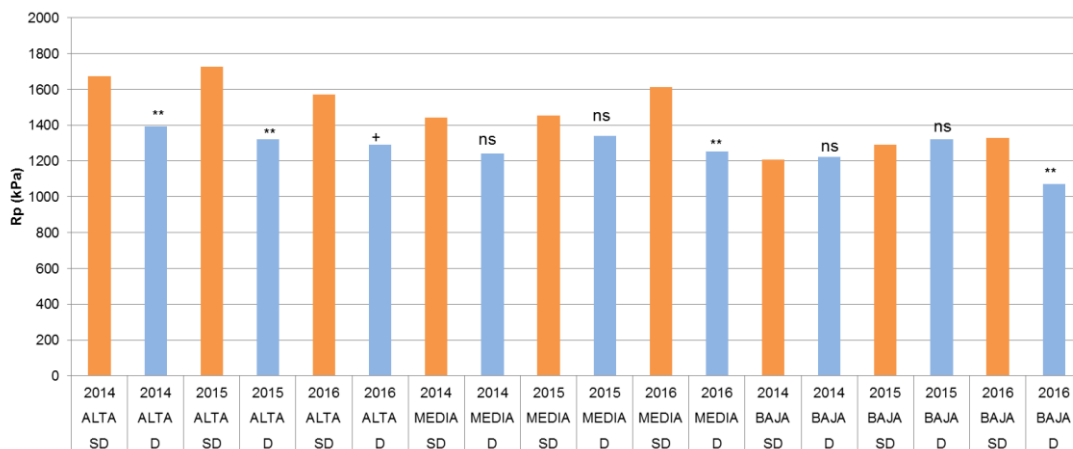
**, Diferente significativamente.

Figura No. 7. Resistencia a la penetración en relación a la interacción año*tratamiento para el rango de profundidad de 4-10 cm.

Los tratamientos SD fueron estadísticamente iguales. Los valores de Rp están por debajo de los niveles críticos reportados por la bibliografía, pero los tratamientos D la redujeron significativamente todos los años. La reducción de la resistencia a la penetración por el pasaje del paraplow fue de 20, 30 y 43% para los años 2014, 2015 y 2016 respectivamente.

Analizando entre las diferentes zonas de compactación del perfil, las zonas no se diferenciaron entre si significativamente en el estrato de 4 a 10 cm de profundidad, pero sí por debajo de los 12 cm y hasta los 40 cm de profundidad, donde se cuantificó una interacción triple significativa ($P \leq 0,05$) entre el año de realizada la descompactación, la zona de compactación y el tratamiento (Figura No. 8).

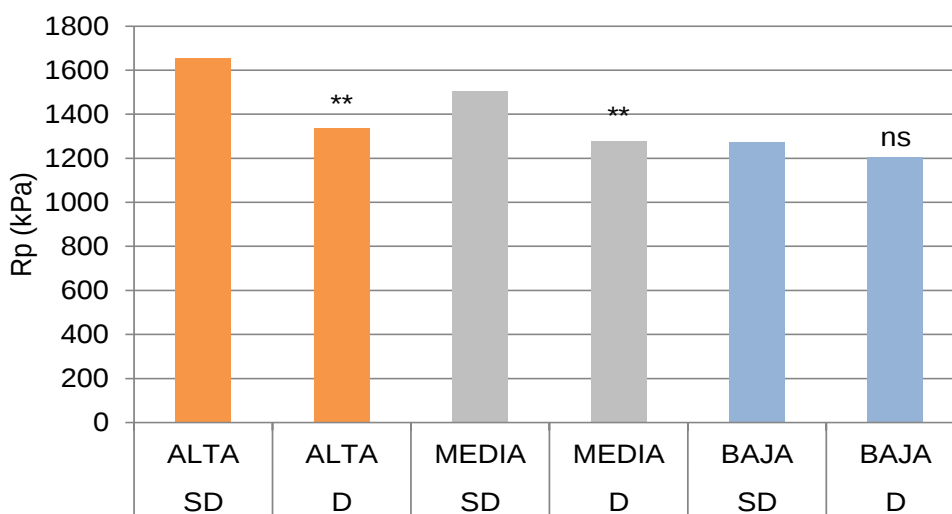
La descompactación realizada en años 2014 y 2015, en zona de ALTA logró mantener un efecto reductor significativo en la Rp medida en el 2016, mostrando la residualidad del mismo. En tanto, no hubo efecto residual significativo en las zonas MEDIA y BAJA. La significancia del tratamiento D realizado el año 2016 en zona ALTA fue al 10% ($P \leq 0,1$), mostrando solo una tendencia a reducir la Rp en 280 kPa entre las medias. Sin embargo existió efecto significativo en las zonas MEDIA y BAJA de dicho año, reduciendo en un 22% (363 kPa) y 19% (257 kPa), respectivamente.



**, Diferente significativamente, ns, no significativo, +, Indica p-valor <0,10.

Figura No. 8. Resistencia a la penetración en relación a la interacción año*tratamiento*zona.

La interacción, año*tratamiento mostró efecto directo y residual de al menos dos años, perdiéndose el efecto del tratamiento realizado el año 2014. Este efecto fue de 11%(1489 vs. 1327 kPa) y 20%(1505 vs. 1205 kPa) para el año 2015 y 2016, respectivamente.



**, Diferente significativamente, ns, no significativo.

Figura No. 9. Resistencia a la penetración en función de la interacción entre zona*tratamiento en el estrato de 12-40cm

El efecto del tratamiento dentro de las zonas de ALTA y MEDIA compactación fue significativo ($p \leq 0,05$), reduciendo la R_p en un 15 y 19 %, respectivamente (Figura No. 9), aproximando los valores a los de la zona de BAJA compactación. Se constató valores de R_p dentro de zonas MEDIA y ALTA compactación en SD, cercano y por encima de 1500 kPa, respectivamente, lo cual estaría limitando el crecimiento radicular, siendo levantada esta limitante con el pasaje del paraplow.

4.3.2 Efecto de la descompactación sub-superficial sobre propiedades químicas

4.3.2.1 Conductividad eléctrica (CE)

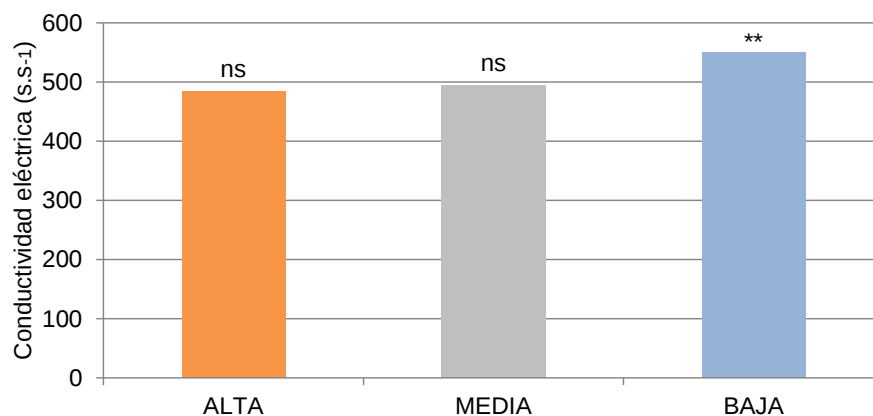
Para conductividad eléctrica medida a campo, existieron diferencias significativas entre los tratamientos a favor del tratamiento SD en relación a D como lo muestra el Cuadro No. 3, a 20 cm de profundidad. No encontrándose interacciones entre tratamiento*zona y tratamiento*año.

Cuadro No. 3. Conductividad eléctrica media (20cm) en respuesta al tratamiento.

Tratamiento	Media ($s.s^{-1}$)	$p \leq 0,05$
SD	318	a
D	290	b

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Por otro lado a una profundidad de 40 cm, solo se encontró diferencias significativas entre zonas, donde la zona de BAJA compactación presentó mayor CE con respecto a las demás zonas, lo se puede ver en la Figura No. 10.



**, Diferente significativamente, ns, no significativo.

Figura No. 10. Conductividad eléctrica media a una profundidad de 40 cm en función de la zona de compactación

4.3.2.2 Otras propiedades evaluadas

En el Cuadro No. 4 se muestran los resultados estadísticos obtenidos sobre bases intercambiables (Ca, Mg y K), conductividad eléctrica en muestra saturada (μs), acidez titulable, fósforo disponible (Bray I) y carbono orgánico en el estrato 0-10 y 10-20 cm. indicados por el p valor ($p > 0,05$ o $p > 0,10$, no diferente estadísticamente).

Cuadro No. 4. Valor P del análisis de varianza para bases intercambiables (Ca, Mg y K), conductividad eléctrica en muestra saturada (μs), acidez titulable, pH al agua y a pH KCl, fósforo disponible (Bray I) y carbono orgánico (C) en el estrato 0-10 y 10 20 cm

Propiedades	Año	Zona	Tratamiento	Año*Zona	Año* Tratamiento	Zona* Tratamiento	Año*zona* Tratamiento
Ca-1*	0,38	0,27	0,52	0,32	0,43	0,91	0,99
Ca-2*	0,91	0,19	0,53	0,19	0,76	0,66	Sin dato
Mg-1	0,009	0,37	0,92	0,23	0,26	0,48	0,63
Mg-2	0,039	0,18	0,28	0,41	0,33	0,12	0,58
K-1	0,026	0,46	0,77	0,22	0,52	0,75	0,93
K-2	0,083	0,94	0,89	0,41	0,7	0,88	0,5
C-1	Sin dato	0,038	0,006	0,34	0,77	Sin dato	0,88
C-2	0,067	0,21	0,37	0,63	0,88	0,55	0,96
μs -1	0,13	0,8	0,47	0,66	0,65	0,87	0,83
μs -2	0,52	0,9	0,83	0,31	0,61	0,97	0,78
P-1	0,18	0,6	0,25	0,81	0,54	0,98	0,62
P-2	0,28	0,62	0,15	0,13	0,54	0,65	0,55
Ac. Titul-1	0,087	0,29	0,76	0,53	0,68	0,7	0,98
Ac. Titul-2	0,15	0,64	0,92	0,12	0,59	0,96	0,8
pH H2O-1	0,66	0,27	0,13	0,67	0,55	0,79	Sin dato
pH H2O-2	0,62	0,81	0,49	0,21	0,81	0,51	Sin dato
pH KCl-1	0,44	0,62	0,31	0,59	0,66	0,82	Sin dato
pH KCl-2	0,85	0,82	0,49	0,92	0,44	0,84	Sin dato

* 1. Indica profundidad de 0-10cm, 2. Profundidad 10-20cm.

Resaltados en naranja se muestran los resultados estadísticamente diferente. La mayoría de la diferencia estadística corresponden al efecto “año de realizada la descompactación”, lo que estaría explicado por la ubicación dentro de la chacra de cada ensayo. En relacion al magnesio, el año 2014 fue significativamente mayor al 2016 en 0 a 10 cm y mayor a 2015 y 2016 en 10 a 20 cm, los valores osilaron entre 1, 52 a 1,96 cmol kg⁻¹.

Al igual que para magnesio, en potasio se encontro una diferencia entre años, en donde el año 2016 presento significativamente mayor disponibilidad que para los datos correspondientes al 2015, no difiriendo con 2014, para ambas profundidades. Los valores variaron de 0,59 a 0,78 cmol kg⁻¹, encontrandose por encima de los niveles criticos reportados por la bibliografia para este nutriente de 0,34 a 0,40 cmolc kg⁻¹ (Barbazán et al., 2011).

En lo que respecta al carbono orgánico del suelo, el pasaje del paraplow aumento levemente pero de manera significativa dicho componente en los primeros 10cm del perfil (Cuadro No. 5). En tanto, en el estrato 10-20 cm,

existió efecto año, sin interacciones con las demás variables. Los valores que se ubicaron en torno a 2,29 a 2,49 %.

Cuadro No. 5. Carbono orgánico del suelo (%), en los primeros 10 cm de suelo, en función de los tratamientos sin laboreo (SD) y descompactado sub_superficialmente (D)

Tratamiento	Media (%)	$p \leq 0,05$
SD	3,2	b
D	3,3	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Para acidez titulable, solo se encontró una diferencia significativa del 10% ($p < 0,10$), en los primeros 10 cm, donde 2014 presentó mayor acidez titulable, con valores de 5,7 para el año 2014 contra 5,6 y 4,98 para 2015 y 2016 respectivamente.

4.3.3 Respuesta del maíz a la descompactación sub superficial

4.3.3.1 Rendimiento

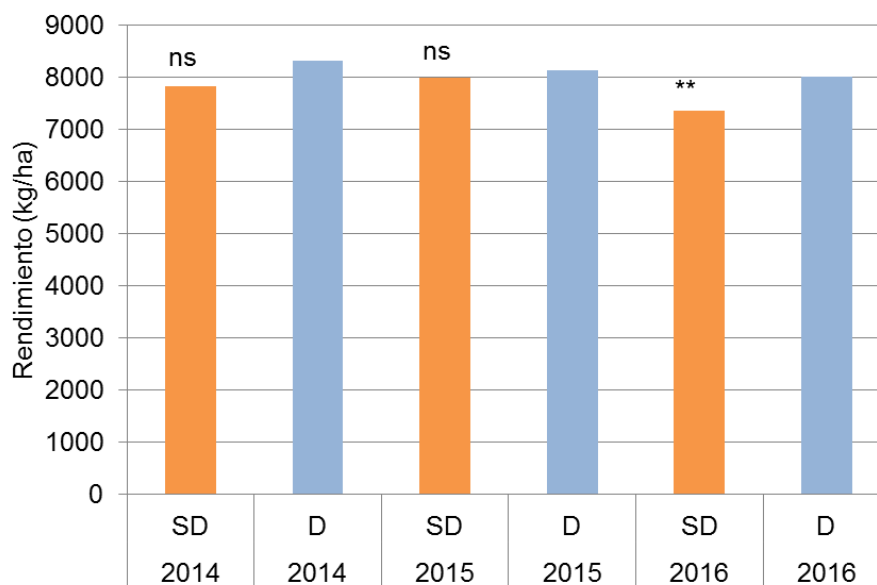
Evaluando la respuesta final del cultivo a la descompactación del suelo ejercida por el paraplow, se constató un incremento medio significativo del 13% ($p \leq 0,05$, Cuadro No. 6).

Cuadro No. 6. Respuesta promedio en rendimiento de maíz a la descompactación sub_superficial del suelo

Tratamiento	Media (kg/ha)	$p \leq 0,05$
SD	7729	b
D	8147	a

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Esta respuesta media corresponde al efecto cuantificado para la descompactación realizada en el 2016, ya que la respuesta a la descompactación 2014 y 2015 fue no significativa (Figura No. 11).



**, Diferente significativamente, ns, no significativo.

Figura No. 11. Rendimiento de maíz en función de la interacción con el año de efectuada la descompactación.

Los resultados muestran que la respuesta significativa en el año 2016 corresponde a un menor rendimiento del tratamiento SD, logrando el tratamiento D ubicar el rendimiento de maíz al mismo nivel que los obtenidos bajo SD y D en los correspondientes a la descompactación realizada en los años 2014 y 2015. Por tanto, no corresponde a un efecto positivo en sí del tratamiento D, sino a un incremento de rendimiento en una zona en la que el maíz en SD tuvo menor rendimiento.

La respuesta no significativa a D en 2014 y 2015 indican que no existió respuesta residual a la descompactación.

Al evaluar el efecto del tratamiento según zona de compactación, tampoco existió diferencia significativa.

4.3.3.2 Otras variables de respuesta evaluadas

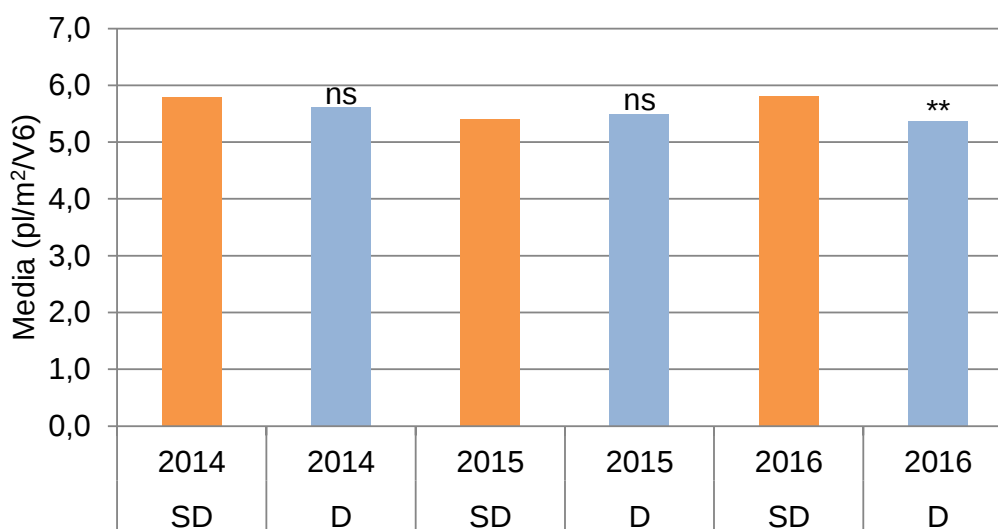
En el Cuadro No. 7 se muestran los resultados estadísticos para las demás variables medidas en el cultivo, indicados por el p valor ($p > 0,05$ o $p > 0,10$, no diferente estadísticamente)

Cuadro No. 7. Análisis estadístico de diferentes variables medidas en el cultivo

	Año	Zona	Tratamiento	Año*Zona	Año* Tratamiento	Zona* Tratamiento	Año*zona* Tratamiento
%N en planta	0,08	0,93	0,12	0,45	0,17	0,66	0,86
No. pl. a V6	0,38	0,68	0,19	0,99	0,19	0,38	0,8
No. pl. a cosecha	0,92	0,48	0,27	0,96	0,33	0,26	0,23

Observando las diferencias significativas en el cuadro, se encontró solamente para %N en planta dentro de la variable año, donde 2014 presentó mayor nivel que 2016 (2,73 %N y 2,63%N, respectivamente).

Además se resalta en el cuadro la interacción año*tratamiento para número de plantas a V6, que si bien la interacción no fue significativa (p valor>0,10), se constató una diferencia significativa entre tratamientos dentro del año 2016, la cual se muestra en la Figura No. 12.



**, Diferente significativamente, ns, no significativo

Figura No. 12. Número de plantas en estado V6 en función de la interacción entre año*tratamiento

En SD se registraron mayor cantidad de plantas por metro cuadrado en comparación a D, 5,6 pl/m² y 5,46 pl/m² respectivamente. Se podría haber

esperado una respuesta en la implantación del cultivo (medido como plantas a V6) inversa a la encontrada.

Las diferencias encontradas en plantas a V6, no se volvieron a encontrar cuando se midió plantas a cosecha, posiblemente explicado por un error en el muestreo.

4.4 ANÁLISIS DE CLASIFICACIÓN Y REGRESIÓN

A continuación se presenta el árbol de clasificación y regresión para rendimiento en grano de maíz en función de las propiedades que incidieron en el rendimiento (Figura No. 13). Es importante resaltar que se trata de un análisis global de la respuesta en rendimiento a las diferentes propiedades, no tomando en cuenta las variables que se analizaron anteriormente (año, zona y tratamiento).

Este análisis confirma que el rendimiento de maíz no respondió de forma directa a la descompactación sub_superficial del suelo medida a través de la resistencia a la penetración, sino que estuvo mayormente asociado a variaciones en propiedades químicas.

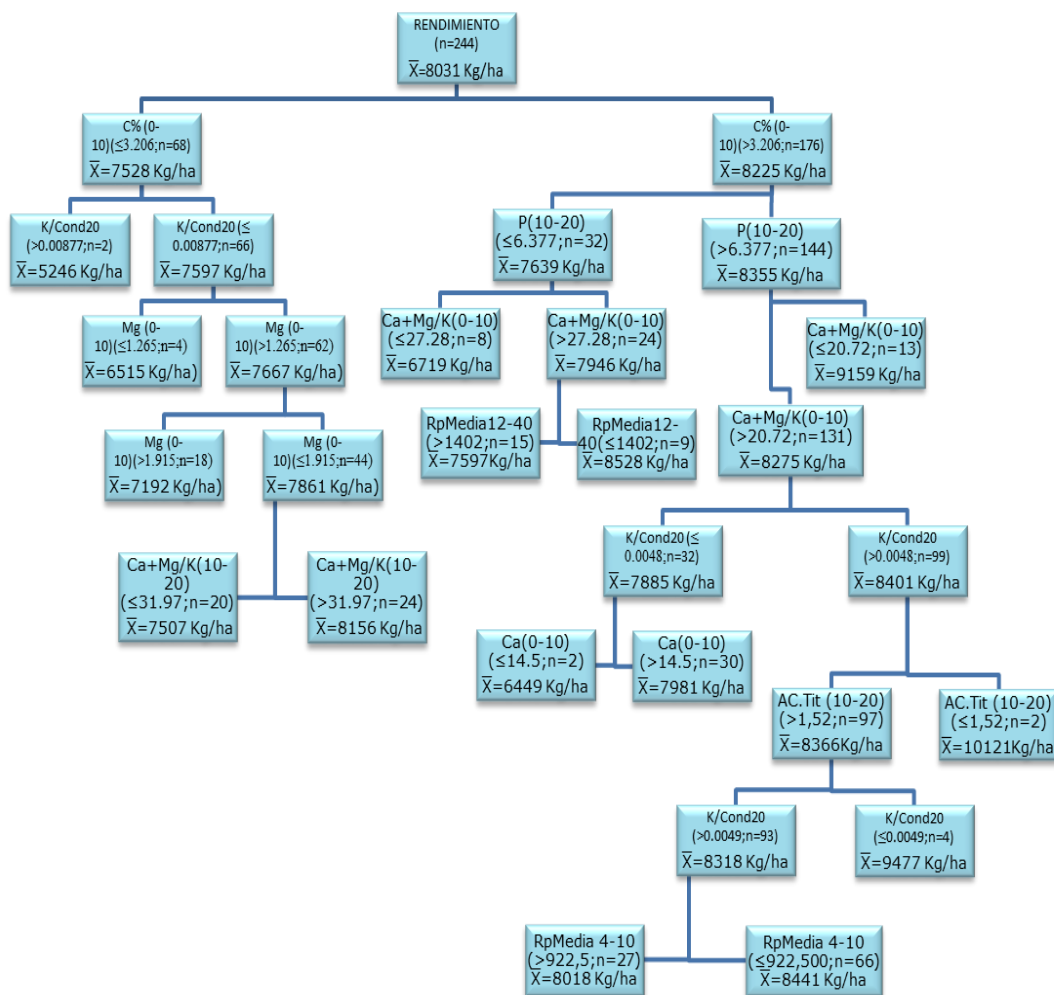


Figura No. 13. Árbol de clasificación y regresión

El rendimiento medio obtenido fue de 8031 kg ha⁻¹, el que fue categorizado en dos ramas en función de la concentración de carbono orgánico del suelo (COS) en los primeros 10 cm. Los mayores rendimientos se obtuvieron cuando el nivel de COS fue superior a 3,2%. Dentro de esta rama el rendimiento fue clasificado en niveles definidos por propiedades químicas (P Bray 1 y relaciones entre bases intercambiables). La última división, separando rendimientos medios superiores a 8000 kg ha⁻¹ fue determinada por la Rp en el estrato superior de suelo. Dentro de la variables que generaron categorías de

rendimiento se pueden destacar, las relaciones entre bases intercambiables disponibles (relación Ca+Mg/K, relación Ca/Mg, relación K/conductividad eléctrica saturada a 10-20cm. Otra de las propiedades químicas a destacar determinante en parte, de altos rendimientos, fue la acidez titulable de 10 a 20 cm, la cual generó dos grupos de rendimiento diferentes en sí en 1700 kg ha^{-1} , alcanzando rendimientos superiores a 10000 kg ha^{-1} , cuando fue menor a $1,52 \text{ meq/100 g}$ de suelo.

Cabe destacar también la incidencia del Mg y Ca de 0-10cm, en la rama de partición de rendimientos bajos, generando diferencia de entorno a los 1000 kg ha^{-1} .

5. DISCUSIÓN

La descompactación mecánica sub_superficial utilizando herramientas como paraplow o paratill tiene como objetivo resolver posibles problemas de compactación del suelo generados en sistemas de agricultura continua sin labranza. A pesar de que la chacra en la que se realizó el experimento tenía más de 15 años de agricultura continua, los valores promedio de resistencia a la penetración de las fajas SD fueron bajos (Figura No. 4), alcanzando valores cercanos a los establecidos como críticos recién en el estrato más profundo evaluado. Por tanto, si bien el tratamiento D redujo significativamente la resistencia a la penetración del suelo tanto como efecto directo como residual (Figura No. 6) la respuesta media del cultivo de maíz fue baja (Cuadro No. 6), asociada a un efecto significativo de D en el año 2016 (Figura No. 11).

Comparando el rendimiento de maíz de los tratamientos SD contra D de los años 2014 y 2015, se puede deducir que más que a una respuesta positiva significativa a descompactar 2016, corresponde a un menor rendimiento de maíz en SD en ese sitio. La respuesta sería indirecta, ya que la resistencia a la penetración del suelo de los tratamientos SD 2016 no difirió de los 2014 y 2015 (Figura No. 4). Esta deducción fue posible por poseer datos de los experimentos realizados en 2014 y 2015, los cuales permitieron comparar los sitios en que se establecieron los diferentes experimentos. De no haber sido así, mirando solo el experimento 2016, se puede deducir que existió un efecto positivo en rendimiento a la descompactación realizada en dicho año.

La escasa respuesta a D podría estar condicionada por las buenas condiciones hídricas de la estación de crecimiento (Figura No. 2). Aunque el crecimiento radicular del maíz pueda reducirse por la compactación, si la planta es capaz de obtener agua y nutrientes suficientes para su crecimiento, la respuesta en el rendimiento a descompactar no es significativos (Taylor y Brar 1991, Sadras et al. 2005).

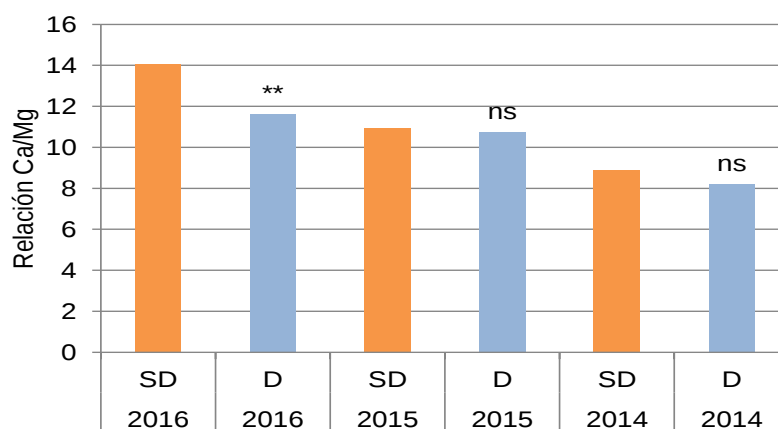
La correlación espacial de la R_p del estrato entre 12 y 40 cm de profundidad permitió identificar zonas con compactación inicial (antes de descompactar) significativamente distintas entre sí (Figuras No. 5, 8 y 9). La respuesta a descompactar estas zonas fue distinta (Figura No. 9), siendo significativa solo en las zonas definidas como de ALTA y MEDIA compactación del suelo. A su vez, la residualidad del efecto D se mantuvo solo para zona ALTA (Figura No. 8), lo que diluye los costos del paraplow en más de un año, pudiendo incidir así en la decisión de la descompactación mecánica.

La R_p de los tratamientos D se ubicó en torno a los 1200 kPa cm⁻² de manera independiente de la compactación inicial, por lo que D redujo la

compactación de la zona ALTA al mismo nivel que el cuantificado en la BAJA. Esta respuesta en el suelo no se tradujo en respuesta diferencial por zona del maíz, cuantificándose solo efecto significativo a la D realizada en el 2016 (Figura No. 11). Analizando la respuesta a D por año, podría deducirse una respuesta significativa del maíz solo a la D realizada en el año de siembra del cultivo (2016) y un efecto residual no significativo a la descompactación en los años previos (2014 y 2015). Pero al analizar la respuesta para el conjunto año*tratamiento, resulta claro que el efecto significativo a D en 2016 corresponde a mejorar un rendimiento menor logrado en SD. Por tanto, D permitió levantar esta restricción, pero que no estaría asociada a mayor RP (Figura No. 8), sino a otras propiedades del suelo.

De la Figura No. 13, surge que antes de que la resistencia a la penetración sea condicionante del rendimiento obtenido, existen otras propiedades que lo condicionan, dentro de las cuales la más importante sería la concentración de carbono del suelo (indicador de fertilidad y aporte de nutrientes), bases intercambiables y acidez del suelo.

La zona correspondiente al año 2016 tuvo una relación calcio/magnesio de 0-10cm mayor (Figura No. 14), encontrándose muy cercana o por encima de una relación que podría estar afectando la absorción de magnesio y potasio por parte del cultivo, provocando así una posible deficiencia de dichos nutrientes.



**, Diferente significativamente, ns, no significativo.

Figura No. 14. Relación Ca/Mg de 0-10cm en función de la interacción entre año*tratamiento

El tratamiento D redujo esta relación a menos de 12, ubicándola en un nivel similar a las otras zonas. No es claro a través de qué mecanismo se logró este efecto, el que podría estar confundido con la respuesta a D en otras

propiedades no cuantificadas en el presente trabajo, como dinámica del agua en el suelo, cambio en la estructura, mejorando la infiltración, drenaje, retención como lo han cuantificado otros trabajos (Klute, Onstad y Voorhees, citados por Horton et al. 1994, Álvarez et al. 2009).

6. CONCLUSIONES

La respuesta en rendimiento del cultivo no estuvo relacionada directamente con la resistencia a la penetración, por lo que no se pudo establecer un nivel crítico, para los valores encontrados en el experimento, a partir del cual exista una respuesta a la descompactación sub_superficial del suelo, mediante el pasaje del paraplow. Posiblemente este nivel crítico de respuesta sea superior a los valores cuantificados en este trabajo.

Las diferencias encontradas en las propiedades químicas como la concentración de nutrientes en suelo, acidez titulable y pH no fueron afectadas por la descompactación mecánica. Se encontró en estas propiedades solo un cambio en la relación de nutrientes, Ca/Mg, que podría explicar parte de la diferencia en rendimiento encontradas entre tratamientos para el año 2016.

A través de la resistencia a la penetración se pudieron establecer tres zonas de diferente compactación, en las cuales se obtuvieron respuesta diferencial del suelo a la D.

En cuanto a la residualidad del tratamiento D, los resultados de la Rp muestran diferencias duraderas de por lo menos dos años, pero no hubo diferencias en el rendimiento de maíz.

La respuesta a la descompactación utilizando paraplow dependerá de cada caso en particular, condicionada por el estado en que se encuentre el suelo en cuanto a las propiedades físicas y las condiciones climáticas del año en que se desarrollen los cultivos. Por lo que se recomienda seguir generando información, abarcando diferentes realidades.

7. RESUMEN

Con el aumento de los precios de los granos, principalmente oleaginosos, a inicios de la década del 2000, se produjo una intensificación de la agricultura que en su mayoría se basó en un sistema de cultivos bajo siembra directa que no rotan con pasturas. Esto conllevó al deterioro de la estructura del suelo, dominado principalmente por el proceso de compactación. Por lo que una de las alternativas disponibles para la solución de dicho problema, es la descompactación mecánica a través de una herramienta de laboreo sub_superficial. En consecuencia este trabajo se centró en evaluar la respuesta de las propiedades físico-químicas del suelo y del cultivo de maíz, al pasaje del paraplow, así como también la residualidad de dicha respuesta. Otro de los objetivos del presente trabajo fue delimitar diferentes zonas de compactación, utilizando como indicador la resistencia a la penetración, las cuales podrían ser tratadas de manera diferencial. Además establecer un límite crítico de resistencia a la penetración a partir del cual existe respuesta a la descompactación mecánica. El paraplow descompactó significativamente el suelo, con una respuesta diferencial según la zona de compactación. La residualidad de la respuesta, también dependió de la zona de compactación. No se pudo establecer un límite crítico de resistencia a la penetración, debido a la falta de respuesta en el cultivo, principalmente rendimiento, para los valores encontrados de este indicador. La respuesta del cultivo se encuentra condicionada por las condiciones climáticas en la estación del crecimiento, esto podría estar explicando la falta de respuesta encontrada por parte del cultivo. En general el pasaje del paraplow no modificó las propiedades químicas del suelo, excepto para carbono orgánico en los primeros 10 cm del suelo, donde se obtuvo una respuesta positiva.

Palabras clave: Siembra directa; Compactación; Paraplow; Resistencia a la penetración; Maíz.

8. SUMMARY

With the increase in grain prices, mainly oilseeds, in the early 2000s, there was an intensification of agriculture that was mostly based on a system of crops under direct seeding that do not rotate with pastures. This caused the deterioration of soil structure, mainly dominated by the compaction process. Therefore, one of the available alternatives for the solution of this problem is the mechanical decompaction with a subsurface tillage tool. Consequently, this work focused on evaluating the response of the physical and chemical properties of the soil and the crop response, to the passage of the paraplow, as well as the residual response. Another objective of the present work was to delimit different compaction zones, using the penetration resistance as an indicator, which could be treated differentially. Also establish a critical limit of penetration resistance where the response to mechanical decompaction would begin. The decompaction caused by the paraplow was significant, with a different response according to the compaction zone. The residual response also depended of the compaction zone. It was not possible to establish a critical limit of penetration resistance, because of to the lack of response in the crop, especially yield, according to the values founded for this indicator. The crop response is conditioned by the climatic conditions in the growing season, this could be explaining the non-response of the crop. In general, the passage of the paraplow did not modify the chemical properties of the soil, except for organic carbon in the first 10 cm of the soil, where a positive response was obtained.

Keywords: Direct drilling; Compaction; Paraplow; Penetration resistance; Corn.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Alakukku, L.; Weisskopf, P.; Chamen, W. C. T.; Tijink, F. G. J.; Van Der Linden, J. P.; Pires, S.; Sommer, C.; Spoor, G. 2003. Prevention strategies for field traffic-induced subsoil compaction: a review. Part 1. Machine/soil interactions. *Soil and Tillage Research*. 73: 145 - 160.
2. Álvarez, C. R.; Taboada, M. Á.; Bustingorri, C.; Gutiérrez Boem, F.; Flavio, H. 2006. Descompactación de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo*. 24 (1): 1 - 11.
3. _____.; Torres, M.; Chamorro, E. R.; D'ambrosio, D.; Miguel, A.; Taboada, M. Á. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 27(2): 159 - 169.
4. _____. 2013. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica*. 10: 2 - 9.
5. Arvidsson, J.; Hakansson, I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil and Tillage Research*. 39: 175 – 197.
6. Azooz, R. H; Arshad, M. A. 2001. Soil water drying and recharge rates as affected by tillage under continuous barley and barleycanola cropping systems in northwestern Canada. *Canadian Journal of Soil Science*. 81: 45 – 52.
7. Ball, B. C.; Campbell, D. J.; Hunter, E. A. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil and Tillage Research*. 57: 83 – 91.
8. Barbazán, M.; Bautes, C.; Beux, L.; Bordóli, M.; Can, J.; Ernst, O.; García, A.; García, F.; Quincke, A. 2011. Fertilización potásica en cultivos de secano sin laboreo en Uruguay: rendimiento según análisis de suelos. *Agrociencia (Uruguay)*. 15 (2): 93 – 99.
9. Barber, R. G.; Díaz, O. 1992. Effects of deep tillage and fertilisation on soya yields in a compacted Ustochrept during seven cropping seasons, Santa Cruz, Bolivia. *Soil and Tillage Research*. 22: 371 - 381.
10. Bono, A.; Quiroga, A.; Azcarate, P.; Kloster, N. 2012. Muestreo e interpretación de análisis de suelos. In: Quiroga, A.; Bono, A. eds.

Manual de fertilidad y evaluación de suelos. Anguil, La Pampa, INTA. cap. 14, pp. 141 - 140.

11. Botta, G. F.; Jorajuría, D.; Rosatto, H.; Ferrero, C. 2006. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 86 (1): 9 - 14.
12. 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: 277 - 293.
13. Busscher, W. J.; Bauer, P. J.; Frederick, J. R. 2002. Recomposition of a coastal loamy sand after deep tillage as a function of subsequent cumulative rainfall. *Soil and Tillage Research*. 68: 49 - 57.
14. Cerisola, C.; Draghi, L.; Jorajuría, D. 2014. Compactación en siembra directa: consecuencias del tránsito durante la operación de siembra sobre la porosidad libre al aire del suelo. *Revista de la Facultad de Agronomía (Montevideo)*. 113 (2): 123 - 133.
15. Chagas, C.; Marelli, H.; Santanatoglia, O. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol Típico bajo tres sistemas de labranza. *Ciencia del Suelo*. 12: 11 - 16.
16. Clapp, R. B.; Hornberger, G. M. 1978. Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resources Research*. 14: 601 - 604.
17. Cochrane, H. R.; Aylmore, L. A. G. 1994. The effects of plant roots on soil structure. In: Triennial Conference "Soils 94" (3rd., 1994, Busselton, W. A). *Proceedings. Nedlands, Australia, The University of Western Australia. Faculty of Agriculture*. pp. 207 - 212.
18. Conlin, T. S. S.; Driessche, R. 2000. Response of soil CO₂ and O₂ concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in central British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science* 80: 625 - 632.
19. Corwin, D. L.; Lesch, S. M. 2003. Application of Soil Electrical Conductivity to Precision Agriculture: theory, Principles, and Guidelines. *Agronomy Journal*. 95: 455 - 471.
20. Daddow, R. L.; Warrington, G. E. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Fort Collins, USDA. Forest Service. pp. 1 - 17.

21. Dauda, A.; Samari, A. 2002. Cowpea yield response to soil compaction under tractor traffic on a sandy loam soil in the semi-arid region of northern Nigeria. *Soil and Tillage Research*. 68: 17 - 22.
22. Dexter, A. R. 1991. Amelioration of soil by natural processes. *Soil and Tillage Research*. 20: 87 - 100
23. Díaz Roselló, R. 1992. Evolución de la materia orgánica en rotaciones de cultivos con pasturas. *Revista INIA Uruguay Investigación Agropecuaria*. 1 (1): 103 - 110.
24. 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.
25. _____.; Duarte, G. A.; Grove, J. H. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 65: 1 - 18.
26. Elissondo, E.; Costa, J. L.; Suero, E.; Fabrizzi, K. P.; García, F. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo*. 19 (1): 11 - 19.
27. Else, M. A.; Janowiak, F.; Atkinson, C. J.; Jackson, M. B. 2009. Root signals and stomata closure in relation to photosynthesis, chlorophyll a fluorescence and adventitious rooting of flooded tomato plants. *Annals of Botany*. 103: 313 - 323.
28. Erbach, D. C.; Cruse, R. M.; Crosbie, T. M.; Timmons, D. R.; Kaspar, T. C.; Potter K. N. 1986. Maize response to tillage-induced soil conditions. *Transactions of the ASAE*. 29: 690 - 695.
29. Ernst, O.; Siri-Prieto, G. 2013. Pérdida de calidad del suelo como factor limitante del rendimiento en el largo plazo. In: Simposio Nacional de Agricultura (3º., 2013, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Paysandú, UdelaR. Facultad de Agronomía. EEMAC. pp.157 - 166.
30. FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, IT). s.f. Conservación de los recursos naturales para una agricultura sostenible. Soluciones para la compactación de suelo. Roma. 23 p.
31. García, F.; Hill, M.; Kaplán, A.; Ponce de León, J.; Rucks, L. 2004. Propiedades físicas del suelo. Montevideo, Facultad de Agronomía. 68 p.

32. Gerster, G.; Bacigaluppo, S.; Bodrero, M.; Salvagiotti, F. 2010. Secuencia de cultivos, descompactación mecánica y rendimiento de soja en un suelo degradado de la región pampeana. INTA. Para Mejorar la Producción. 45: 59 - 61.
33. Giménez, L. 2007. Seminario Importancia del agua en el actual escenario agrícola. Posibilidades de aplicación de riego suplementario. Paysandú, UdelaR. Facultad de Agronomía. EEMAC. pp. 23 - 34.
34. Gómez, J. A; Giraldez, J. V; Pastor, M.; Ferreres, E. 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. Soil and Tillage Research. 52: 167 - 175.
35. Grzesiak, M. T. 2009. Impact of soil compaction on root architecture, leaf water status, gas exchange and growth of maize and triticales seedlings. Plant Root. 3: 10 - 16.
36. Grzesiak, S.; Grzesiak, M. T.; Hura, T.; Marcinska, I.; Rzepka, A. 2013. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticales seedlings affected by soil compaction. Environmental and Experimental Botany. 88: 2 - 10.
37. Gupta, S. C.; Larson, W. E. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. Water Resources Research. 15: 1633 - 1635.
38. Hakansson, I.; Voorhees, W. B.; Riley, H. 1988. Vehicle and Wheel Factors Influencing Soil Compaction and Crop Response in Different Traffic Regimes. Soil and Tillage Research. 11: 239 - 284.
39. _____.; Reeder, R. C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load extent, persistence and crop response. Soil and Tillage Research. 29: 277 - 304.
40. Hall, D. J. M.; McKenzie, D. C.; MacLeod, D. A.; Toolt, I. D. 1994. Amelioration of a hardsetting Alfisol through deep mouldboard ploughing, gypsum application and double cropping. II. Soilwater relations. Soil and Tillage Research. 28: 271 - 285.
41. 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: 139 - 140.
42. Horton, R.; Ankeny, M. D.; Allmaras, R. R. 1994. Effects of Compaction on Soil Hydraulic Properties. Soil Hydraulic Properties. 7: 141 - 165.

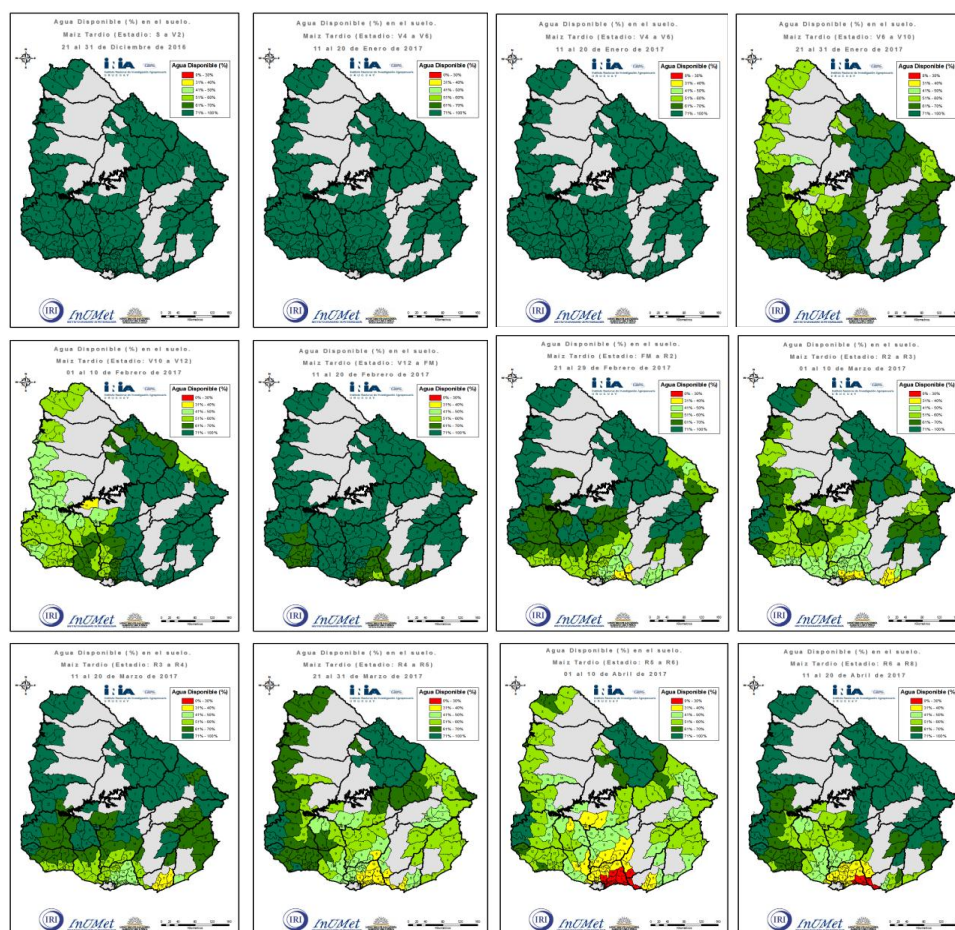
43. Ide, G.; Hofman, G.; Ossemerct, C.; van Ruymbeke, M. 1984. Root-growth response of winter barley to subsoiling. *Soil and Tillage Research*. 4:419 - 431.
44. Ishaq, M.; Hassan, A.; Saeed, M.; Ibrahim, M.; Lal, R. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan. *Soil and Tillage Research*. 59: 57 - 65.
45. Jorajuria, D.; Draghi, L. 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola parte 1: influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 4 (3): 445 - 452.
46. Julca, O.; Meneses, L.; Blas, L.; Bello, S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. *IDESIA (Chile)*. 24 (1): 49 - 61
47. Kondo, M. K.; Días Junior, M. S. 1999. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 23: 211 - 218.
48. Logsdon, S. D.; Allmaras, R. R.; Nelson, W. W.; Voorhees, W. B. 1992. Persistence of subsoil compaction from heavy axle loads. *Soil and Tillage Research*. 23: 95 - 110.
49. _____.; Kaspar, T. C.; Cambardella, C. A. 1999. Depth incremental properties under no-till or chisel management. *Soil Science Society of America Journal*. 63 (1):197 - 200.
50. 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.
51. Martínez, E.; Fuentes, J. P.; Acevedo, E. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 8 (1): 68 - 96.
52. Martino, D. L. 1998. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. Tesis PhD. Manitoba, Canadá. University of Manitoba. 289 p.
53. _____.; Díaz Rosselló, R. 2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Díaz Rosselló, R. coord. *Siembra directa en el cono Sur*. Montevideo, PROCISUR. pp. 225-257 (Serie Documentos).
54. Moffat, A. J.; Boswell, R. C. 1996. The effectiveness of cultivation using the winged tine on restored sand and gravel workings. *Soil and Tillage Research*. 40: 111 - 124.

55. Montavalli, P. P.; Anderson, S. H.; Pengthamkeerati, P. 2003. Surface compaction and poultry litter effects on corn growth, nitrogen availability, and physical properties of a claypan soil. *Field Crops Research*. 84: 303 - 318.
56. Mukhtar, S.; Baker J. L.; Horton, R.; Erbach D. C. 1985. Soil water infiltration as affected by the use of the paraplow. *Transaction of ASAE*. 28: 1811 - 1816.
57. Neve, S.; Hofman, G. 2000. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology and Fertility of Soils*. 30: 544 - 549.
58. Olsen, H. J. 1994. Calculation of subsoil stresses. *Soil and Tillage Research*. 29: 111 - 123.
59. Radford, B. J.; Bridge, B. J.; Davis, R. J.; McGarryd, D.; Pillai, U. P.; Rickman, J. F.; Walsh, P. A.; Yule, D. 2000. Changes in the properties of a Vertisol and responses of wheat after compaction with harvester traffic. *Soil and Tillage Research*. 54: 155 - 170.
60. Sadras, V.; O'leary, G. ; Roget, D. 2005. Crop responses to compacted soil; capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. 91 (2-3): 131 - 148.
61. Salvo, L.; Hernández, J.; Ernst, O. 2010. Distribution of soil organic carbon in different size fractions, under pasture and crop rotations with conventional tillage and no-till systems. *Soil and Tillage Research*. 109: 116 - 122.
62. Sasal, M. C.; Andriulo, A. E.; Taboada, M. A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil and Tillage Research*. 87: 9 – 18.
63. Sawchik, J.; Siri, G.; Ayala, W.; Barrios, E.; Bustamante, M. Ceriani, M.; Gutiérrez, F.; Mosqueira, J.; Otaño, C.; Pérez, M.; Piñeiro, G.; Pinto, P.; Terra, J.; Zarza, R. 2015. El sistema agrícola bajo amenaza: ¿qué aportan los cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas? In: *Simposio Nacional de la Agricultura (4º, 2015, Paysandú)*. Buscando el camino de la intensificación sostenible para la agricultura. Paysandú, UdelaR. Facultad de Agronomía. EEMAC. pp. 149 – 168.
64. Saxton, K. E.; Rawls, W. J.; Romberger, J. S.; Papendiek, R. I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*. 50: 1031-1036.

65. 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.
66. Siri Prieto, G.; Ernst, O. 2009. Cambios en el contenido de carbono y nitrógeno del suelo: ¿hacia dónde va el sistema? *In*: Simposio Nacional de Agricultura de Secano (1º., 2009, Paysandú). Trabajos presentados. Paysandú, UdelaR. Facultad de Agronomía. EEMAC. pp. 111 - 124.
67. Soane, B. D.; Butson, M. J.; Pidgeon, J. D. 1975. Soil/machine interactions in zero-tillage for cereals and raspberries in Scotland. *Outlook on Agriculture*. 8: 221 - 226.
68. Soracco, G.; Filgueira, R.; Sarli, G.; Fournier, L.; Gelati, P.; Hilbert, J. 2009. Persistencia del efecto del subsolado sobre el movimiento del agua en el suelo en siembra directa. Uso de dos modelos teóricos. *Ciencia del Suelo (Argentina)*. 27(1): 77 - 87.
69. Strudley, M. W.; Green, T. R.; Ascough, J. C II. 2008. Tillage effect on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil and Tillage Research*. 99: 4 - 48.
70. Studdert, G. A.; Echeverría, H. E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Science Society of America Journal*. 64: 1496 - 1503.
71. Taylor, H.; Brar, G. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*. 19: 111 - 119.
72. Terra, J.; García Préchac, F. 2002. Soil organic carbon content of a Typic Argiudoll in Uruguay, under forage crops and pasture rotations for direct grazing: effect of tillage intensity and rotation system. *In*: Annual Southern Conservation and Tillage Conference for Sustainable Agriculture (25th., 2002, Auburn, AL). Making Conservation Tillage Conventional: building a Future on 25 Years of Research. Alabama, USA, Auburn University. pp. 70 – 73.
73. Touchton, J. T.; Reeves, D. W.; Delaney, D. P. 1989. Tillage systems for summer crops following winter grazing. *In*: Annual Southern Conservation Tillage Conference (23rd., 1989, Tallahassee, FL). Communications Soil Science Plant Analysis. Alabama, USA, Auburn University. pp. 72 - 75.

74. 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.
75. Vieira Cavalieri, K. M.; Pires da Silva, A.; Arvidsson, J.; Tormena, C. A. 2009. Influência da carga mecânica de máquina sobre propriedades físicas de um cambissolo háplico. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 33: 477 – 485.
76. Zhang, H. 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil and Tillage Research*. 31: 263 – 275.

10. ANEXOS



Anexo No. 1. Agua disponible (%) en el suelo para cultivo de maíz tardío en el período diciembre 2016 – mayo 2017.

Fuente: INIA. GRAS⁴

⁴ INIA. GRAS (Instituto de Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agro-clima y sistemas de Información, UY). 2018. Datos meteorológicos para maíz tardío, por sección policial (sin publicar).