

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

RESPUESTA A LA DESCOMPACTACIÓN EN PROPIEDADES DE
SUELO Y RENDIMIENTO DE MAÍZ

por

Facundo BACELO MESSANO

Daniel MACCHI CERIANI

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

.....
.....

Fecha: 11 de enero de 2019

Autores:

Facundo Bacelo Messano

.....
Daniel Macchi Ceriani

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer por la colaboración y apoyo a lo largo de toda nuestra carrera estudiantil a nuestras familias, compañeros y amigos.

Por el apoyo en la elaboración de este documento a nuestro tutor Oswaldo Ernst y a sus colaboradores Pilar Etchegoimberry y Ramiro Izaguirre.

TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	V
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u>	2
2.1. GENERACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
2.2. RESPUESTA DE LOS CULTIVOS.....	4
2.3. HIPÓTESIS.....	6
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	7
3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL.....	7
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y DETERMINACIONES.....	8
3.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS.....	10
4. <u>RESULTADOS</u>	11
4.1 PERFIL DE RESISTENCIA DEL SUELO.....	11
4.2 PORCENTAJE DE CADA ESTRUCTURA EN EL PERFIL DEL SUELO.....	12
4.3 DENSIDAD APARENTE DE CADA ESTRUCTURA.....	13
4.4 PROPORCIÓN DE CADA ESTRUCTURA DENTRO DEL PERFIL SEGÚN TRATAMIENTO.....	14
4.5. RESULTADOS DE LOS TRATAMIENTOS Y ZONAS SOBRE EL RENDIMIENTO.....	15
5. <u>DISCUSIÓN</u>	18
6. <u>CONCLUSIONES</u>	20
7. <u>RESUMEN</u>	21
8. <u>SUMMARY</u>	22
9. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	23

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Figura No.	Página
1. Distribución espacial de zonas de rendimiento diferencial de soja y su variabilidad.....	7
Foto No.	
1. Calicata para estudio del perfil del suelo.....	9
Gráfico No.	
1. Perfil de resistencia a la penetración para los primeros 40 cm del perfil del suelo para los tratamientos testigo (T) y descompactado (D).....	10
2. Proporción de las diferentes estructuras de suelo dentro de las zonas estudiadas.....	11
3. Densidad aparente de las diferentes estructuras dentro de las zonas estudiadas.....	12
4. Proporción de agregados del suelo agrupados por tipo de estructura dentro del perfil en la zona de rendimiento.....	13
5. Efecto promedio de la descompactación sub_superficial sobre el rendimiento en grano de maíz.....	14
6. Efecto de las diferentes zonas sobre el rendimiento.....	15
7. Rendimiento en grano de maíz diferenciado por tratamiento y zona para un mismo año.....	15

1. INTRODUCCIÓN

La agricultura en Uruguay es uno de los principales rubros exportadores y aporta un porcentaje muy elevado de capital al PBI nacional. En base a esto se han desarrollado diferentes líneas de investigación con el objetivo de desarrollar y mejorar tecnologías para lograr mejores resultados económicos y sustentables a la vez.

A lo largo de la historia agrícola del Uruguay las técnicas y tecnologías asociadas al rubro han sido modificadas buscando el objetivo mencionado anteriormente. En los años 50 se utilizaba la agricultura continua con laboreo basado en 2 cultivos principales, trigo y lino. Cuando los rendimientos se vieron estancados se incursionó en la rotación de cultivos con pasturas pero no con una rotación definida. En los años 90 se incluyó como medida correctiva para los problemas ocasionados por el laboreo la utilización de la siembra directa, una tecnología que prometía aumentar rendimientos y disminuir el impacto ambiental del laboreo convencional.

La incorporación de la siembra directa generó nuevos problemas como ser la compactación excesiva del suelo por su uso prolongado sin generar un intercambio gaseoso con la atmósfera al dar vuelta la tierra con el arado de vertederas antiguamente utilizado. Por esta razón, los investigadores hicieron foco en mejorar el efecto positivo de la siembra directa sin tener que incurrir en los puntos negativos de esta.

En este trabajo se trata de mostrar el impacto que tiene la descompactación subsuperficial sin dar vuelta el suelo y generar esa oxidación del carbono orgánico del suelo indeseable. A su vez, busca mostrar el efecto que tiene esta práctica en la resistencia a la penetración del suelo por parte de las raíces de maíz y su impacto en el rendimiento final de grano.

Cuantificar el efecto residual de la descompactación mecánica sub_superficial del suelo sobre la resistencia mecánica a la penetración del suelo.

Caracterizar la estructura del suelo y la respuesta a la descompactación mecánica sub_superficial utilizando el método para la descripción del perfil cultural del suelo (Boizard et al., 2016).

Cuantificar la respuesta residual a la descompactación mecánica sub_superficial del suelo en rendimiento de grano de maíz sembrado sin labranza.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. GENERACIÓN DEL PROBLEMA

La agricultura de la región ha evolucionado y modificado sus procesos a lo largo de los últimos 50 años.

En un origen, la agricultura se basaba en las necesidades de la población de obtener alimento, realizando un cultivo por estación con fines alimenticios. Con el nacimiento del comercio, comenzó a intensificarse, buscando lograr mejores resultados sin tener que expandir las fronteras, es decir, intensificando el uso de los recursos. Para eso se utilizó un modelo de producción que involucraba el laboreo de suelos. El uso de este modelo se basaba en la utilización de herramientas de laboreo de suelo como medida para combatir malezas, enfermedades y mejorar la fertilidad de suelo.

Este modelo se mejoró con la incorporación de pasturas en rotación. Esto implicaba el agregado de una fase de producción no tan extractiva, pero con mayores retornos de carbono y nutrientes al suelo. Por un lado, se sumó, el aporte de nitrógeno por fijación simbiótica de las leguminosas y la presencia de las gramíneas perennes favoreció la estructura del suelo. Ya para los años 90' se incorporó como modelo productivo la rotación cultivo-pastura que eliminó por completo el laboreo convencional. Cuando se logró establecer el nuevo modelo, se modificó nuevamente una coyuntura mundial de mercados y precios favorables a los granos, por lo que se sustituyeron las pasturas como forma de aumentar la producción por unidad de tiempo (Ernst y Siri, 2011).

A partir de esta situación, el modelo dominante en los últimos 15 años es definido como "agricultura continua sin laboreo", incorporando maquinaria específica para la siembra en estas condiciones. Bajo este sistema, comenzaron a manifestarse pérdidas de rendimiento atribuibles a la compactación del suelo, atribuible esta, a la pérdida de materia orgánica de los suelos y al tráfico con maquinaria (Botta et al., 2004). Descompactar mecánicamente el suelo tiene efectos importantes sobre el rendimiento, pero con efectos residuales nulos, incluso generando efectos adversos como la acelerada descomposición de materia orgánica y erosión de suelo (Franzlubbers et al., 2007).

El no laboreo de suelo puede incrementar la densidad aparente del suelo y afectar negativamente la producción de biomasa, la relación hídrica del cultivo y el acceso a nutrientes, por lo que el uso de herramientas de descompactación subsuperficial del suelo, como paraplow o paratill, surgieron como alternativas para mitigar este efecto negativo de la siembra directa (Wesley et al., 2001). La

elección de este tipo de herramientas se basa en la no inversión de suelo, es un laboreo vertical que disminuye la oxidación de la materia orgánica. La propuesta de usar estas herramientas es porque no invierten el suelo, por lo que dejan el rastrojo sobre la superficie, logrando así mantener ventajas asociadas a no laborear.

Según información recopilada de diferentes estudios no publicados del USDA, si bien la técnica supone que mejore el almacenamiento de agua y nutrientes en el suelo, su costo es muy elevados en relación a los beneficios obtenidos.

El estudio realizado por Franzluebbbers et al. (2007) reveló que el uso de paraplow resultó en una disminución de la densidad aparente en todas las profundidades pero especialmente entre los 3 cm y los 20 cm del perfil de suelo. A medida que pasa el tiempo desde que se pasó la herramienta, el efecto positivo disminuye. El impacto sobre el carbono orgánico del suelo se localizó solo en los primeros 3 cm del suelo. El contenido de nitrógeno total de suelo no se vio modificado por el uso de paraplow. En cuanto al contenido de fósforo disponible, se esperaba que el uso de la herramienta aumentara el contenido de dicho nutriente, pero las diferencias fueron no significativas.

La mayoría de los suelos de la región con aptitud agrícola están compuestos por suelos pesados, argisoles, vertisoles y brunosoles. En este tipo de suelos, es común que se registre compactación por formación de estructuras masivas en respuesta a la agricultura sin labranza (Senigalesi y Ferrari, 1993). Recientemente se ha cuantificado, en agricultura continua sin labranza, la formación de estructura laminar superficial, formada por fragmentos finos y chatos orientados paralelamente con el horizonte del suelo (Borel et al. 2005, Álvarez et al. 2009). Ensayos en la zona de Pergamino, Provincia de Buenos Aires, Argentina, demuestran que esta estructura laminar restringe la entrada de agua al perfil y el crecimiento radicular (Sasal et al., 2016a). En el 72% de los casos estudiados en esta región, los primeros cm de suelo presentaron estructuras granulares con buena presencia de raíces y porosidad (Sasal et al., 2016a). A su vez, en todos los suelos ya sea en la capa superficial del suelo o debajo de la capa granular se encontró una estructura laminar importante ubicada horizontalmente (Sasal et al., 2016a). Según Sasal et al. (2016a), esta capa tiene entre 2-10 cm de espesor y representa entre el 4 y el 58% del total del horizonte A.

Caron (1992), Taboada (1998), afirman que la alta proporción de suelo masivamente compactado y con alta cohesión se puede asociar con el uso de maquinaria o por la cantidad de años de sucesiva siembra directa. Similares resultados encontraron Álvarez et al. (2004). Suelos manejados con siembra directa presentaron valores de resistencia a la penetración más elevados y, en

algunos casos, aumento de la densidad aparente. Lo atribuyen a la ausencia de remoción, sumado al efecto compactante derivado del pasaje de maquinarias (Botta et al., 2004). Ambos parámetros de fertilidad física se relacionan con la aptitud de los perfiles de suelo para permitir el crecimiento de las raíces de los cultivos en forma no limitante para los rendimientos (Glinski y Lipiec, 1990). El crecimiento radicular se ve impedido cuando ambos parámetros exceden umbrales reconocidos, que para el caso de la resistencia a la penetración es en torno a 2-3 MPa.

Sasal et al. (2016b) sugieren que el desarrollo de estructura laminar crece con los años de agricultura continua, alcanzando un máximo en torno a 50%, a los 15 años, restringiendo la infiltración, favoreciendo la escorrentía, aumentando la erosión en el horizonte A. También Kay y Vandenbygaart (2002) establecieron que los efectos negativos de la siembra directa en la porosidad y la compactación del suelo demoran en manifestarse 15 años.

La regeneración del suelo luego de una fuerte compactación depende del tipo de suelo y el grado de daño que este tenga (Pagliai et al., 2003). Los suelos con alto contenido de limo (2-20 μm), se consideran problemáticos en términos de estructura, particularmente debido a la alta susceptibilidad a la degradación física asociada con baja resistencia mecánica (Stengel et al., 1984), y son considerados de baja resiliencia, relacionado con la baja capacidad de contracción-hinchamiento de los minerales que lo componen (Taboada et al., 2004, 2008). Los períodos de alternancia entre suelo húmedo y suelo seco en texturas limosas favorecen la compactación Sasal et al. (2016b). Como la fuerza del suelo depende en gran medida del contenido de agua, los suelos húmedos son mucho más susceptibles a la compactación que los suelos secos (Botta et al., 2004). Una regla general para no compactar es prohibir el tráfico cuando los suelos están más húmedos que la capacidad del campo, aunque esto puede no dar cuenta de las condiciones en el subsuelo (Chamen et al., 2015).

2.2. RESPUESTA DE LOS CULTIVOS

Para el maíz en un suelo Argisol típico, Tolón-Becerra et al. (2011) encontraron que los valores del índice del cono superiores a 1,7 MPa, particularmente en las capas superficiales, generaron condiciones físicas del suelo inadecuadas para la emergencia de plántulas de maíz, crecimiento de la raíz y reducción de rendimientos (entre 10,7-15,2%).

Se han descrito reducciones en las concentraciones de nutrientes foliares que aparentemente afectaron los rendimientos de los cultivos en suelos compactados (Bennie y Krynauw 1985, Lowery y Schuler 1994). La compactación también reduce el crecimiento y rendimiento de las plantas al afectar el agua en la filtración, aireación y presión de la enfermedad (Unger y Kaspar, 1994).

Según Díaz Zorita et al. (2000), el subsolado de un suelo compactado debe aflojarlo y mejorar su condición física y disponibilidad de nutrientes. En consecuencia, los requisitos de fertilización nitrogenada podrían reducirse y los rendimientos de grano aumentarían. El mismo autor, establece que los resultados de utilizar la herramienta de descompactación fueron significativos al momento de siembra pero que luego de transcurrido ese periodo los cambios en la resistencia a la penetración no fueron importantes. En este artículo, se mostraron los resultados en rendimiento de grano para los tres tratamientos generando diferencias significativas únicamente en el tratamiento "Fertilizado con nitrógeno" mientras que en los distintos tratamientos de laboreo, los resultados fueron estadísticamente iguales.

Álvarez et al. (2006) encontraron que la tasa de infiltración de agua presentó diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre tratamientos en el momento de la siembra. Éstas diferencias disminuyeron al momento de la cosecha, demostrando una baja perdurabilidad de la práctica de descompactación sobre el ingreso de agua al perfil del suelo.

El desarrollo en maquinaria, herbicidas y criterios de manejo re establecieron la siembra directa como una alternativa fuerte para el crecimiento de cultivos. Sin embargo, Baker et al. (1996) registraron que esta medida generó que los sistemas radiculares sean más pequeños, menor vigor en las plantas y menores rendimientos en grano en comparación con aquellos que tuvieron medidas de laboreo convencional (Hamilton et al., 2002).

En el mismo artículo, Hamilton et al. (2002) generaron información que afirma que no hay diferencias significativas entre los tratamientos de suelo con

subsolador de varios dientes, subsolador con diente fijo y paraplow para la densidad aparente en el suelo. Concluyeron que la descompactación del suelo mejoró las condiciones físicas del suelo entre 0 y 30 cm del perfil de suelo. Esto generó muy poco impacto en la profundidad de arraigamiento de los cultivos en estudio.

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

2.3. DESCRIPCIÓN DEL PERFIL CULTURAL DEL SUELO

Cambios en el tipo de estructuras son frecuentemente asociados con los años de agricultura sin labranza, en especial, la generación de estructuras laminares superficiales. Es posible cuantificar esos cambios utilizando metodologías basadas en la apreciación visual del perfil del suelo (Boizard et al. 2012, 2016, Sasal et al. 2016a, 2016b). Esto supone la detección visual y la clasificación de estructuras de acuerdo al grado de cohesión y a la presencia o no de macroporosidad. Esta metodología, denominada “Perfil Cultural”, fue desarrollada por Gautronneau et al. (1987) en Francia. El método permite evaluar detalladamente la estructura del perfil del suelo, cuantificar su variabilidad espacial y cuantificar sus proporciones dentro del total del perfil (Gautronneau et al. 1987, Roger-Estrade et al. 2004). Recientemente este método fue ajustado para poder utilizarlos en sistemas sin labranza (Boizard et al., 2016).

2.4. HIPÓTESIS

Hipótesis 1. La compactación del suelo en agricultura continua no es homogénea espacialmente ni en el perfil del suelo.

Hipótesis 2. Es posible identificar y cuantificar esta variabilidad utilizando una técnica de descripción del perfil cultural del suelo.

Hipótesis 3. Existe efecto residual de la descompactación cuantificada como mejora en la estructura del suelo y reducción de la resistencia mecánica a la penetración.

Hipótesis 4. Existe respuesta residual positiva a la descompactación cuantificada como rendimiento en grano de maíz.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

El trabajo se realizó en un experimento ubicado en el Departamento de Soriano, 33°25'34.21"S 57°58'53.38"W, sobre suelos caracterizados como Brunosol eútrico típico moderadamente profundos de color negro, textura franco arcillosa, fertilidad alta y muy alta y moderadamente bien drenados (Altamirano et al., 1976). El mismo consta de dos tratamientos: testigo sin labranza (T) y descompactado mecánico sub-superficial (D), utilizando un paratill, aplicado en dos años diferentes, otoño del 2014 y otoño del 2015, generándose los tratamientos T2014, D2014, T2015 y D2015. El diseño experimental corresponde a fajas apareadas de 20* 300m con tres repeticiones. Etchegoimberry et al. (2017) identificaron 3 zonas homogéneas definidas en base al rendimiento y variabilidad interanual de cultivos de soja de las zafras 2014_15 y 2015_2016 (Figura No. 1). Las zonas corresponden a rendimiento Alto_estable, Bajo_estable y Alto_variable.

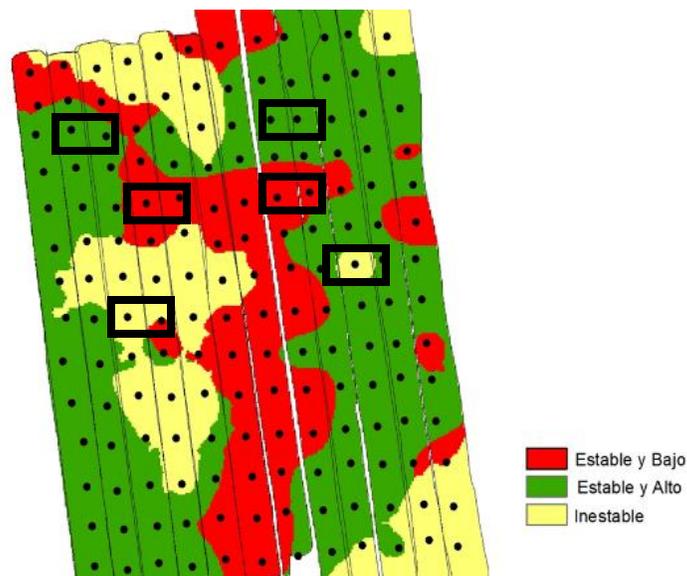


Figura No. 1. Distribución espacial de zonas de rendimiento diferencial de soja y su variabilidad. Fuente: Etchegoimberry et al. (2017).

El presente trabajo corresponde a determinaciones realizadas en junio del 2017 en 1 sitio de muestreo por cada una de estas zonas homogéneas dentro de año de descompactación.

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y DETERMINACIONES

En junio del 2017 se seleccionaron 3 sitios dentro de cada año de descompactación (2014 y 2015), ubicado uno en cada zona homogénea definida por rendimiento de soja y su variabilidad (Alto_estable; Bajo_estable; Alto_variable). En cada uno de ellos se realizó una calicata 2 m de largo por 1 m de ancho por 0,4 m de profundidad, ubicada de manera transversal en el borde entre fajas T y D, por lo que corresponde 1m de ancho a cada tratamiento.

El diseño no permite cuantificar el efecto residual diferencial de la descompactación sub_suprficial realizada en los años 2014 y 2015, por lo que los resultados muestran el efecto residual promedio de los tratamientos aplicados en éstos dos años, cuantificados en rendimiento de maíz sembrado en el 2016 y en el suelo luego de la cosecha del maíz.

El 13 de junio del 2017 se registró el perfil de resistencia mecánica a la penetración del suelo en el estrato de 0-40 cm de profundidad, realizándose 3 tomas por tratamiento. Para ello se utilizó un penetrógrafo Remik CP 20, realizando una medida cada 2 cm, con el suelo a humedad cercana a capacidad de campo.

En la superficie expuesta de cada calicata y para cada mitad correspondiente a la parcela T y D se realizaron las siguientes determinaciones:

1. Identificación visual de zonas con estructuras del suelo diferencial y dificultad de penetración con herramientas manuales, para lo cual se utilizó un cuchillo. Para ello se siguió la metodología propuesta por Gautrennau y Manichon (1987), actualizada para siembra directa o laboreo reducido (Boizard et al., 2016). Se identificaron estructuras de acuerdo al tamaño y la forma de los agregados y la porosidad visible. Definidas las áreas, las mismas se delimitaron con un elemento visible y se fotografió el perfil. Las áreas delimitadas se clasificaron como: Tipo "O" cuando el suelo está altamente fragmentado, con pequeños agregados y dominio de fracciones finas. El tipo "B" cuando presenta agregados mayores a 10cm, con porosidad visible, y menor dominio de fracciones finas y Tipo "C" donde no se distinguen agregados, y el suelo presenta características masivas.

2. Se delimitaron las zonas utilizando hilos de color amarillo (estructura Tipo "O"), rojo (estructura tipo "B") y azul (estructura tipo "C").

3. En cada zona identificada dentro de la calicata se cuantificó la resistencia a la penetración de manera perpendicular a la pared de la calicata, y se tomaron 6 muestras de $9,2 \text{ cm}^3$ de suelo utilizando un taladro de $1,84 * 5 \text{ cm}$. Se determinó el peso húmedo de la muestra y se fraccionó en dos. Una mitad de cada muestra utilizada para determinar el peso húmedo y seco a estufa a 105° C hasta peso constante. En base a esto se estimó la densidad aparente del suelo (g cm^{-3}).

4. Cada calicata fue fotografiada, enmarcada con una cinta métrica de referencia horizontal y vertical (Foto No. 1). A partir de cada foto, se calculó la proporción del suelo categorizada como estructura granular (Tipo O), descompactado (Tipo B) y compactado (Tipo C). Para ello, las fotos se procesaron utilizando el software ArcGis 10.0. Se dibujaron polígonos cuyo contorno fueron los hilos utilizados para delimitar las zonas (Foto No.1), se estimó la superficie de cada polígono, calculando así la proporción representada por cada uno de ellos.



Foto No. 1. Calicata para estudio del perfil del suelo.



Foto No. 2. Calicata para estudio del perfil del suelo 2.



Foto No. 3. Calicata para estudio del perfil del suelo 3.



Foto No. 4. Perfil cultural del suelo completo.

3.3 ANÁLISIS DE LOS DATOS

Los resultados fueron analizados utilizando un modelo mixto donde los tratamientos (T y D), ambientes y su interacción fueron considerados como efectos fijos y el año de realizada la descompactación como un efecto aleatorio.

4. RESULTADOS

4.1 PRECIPITACIONES

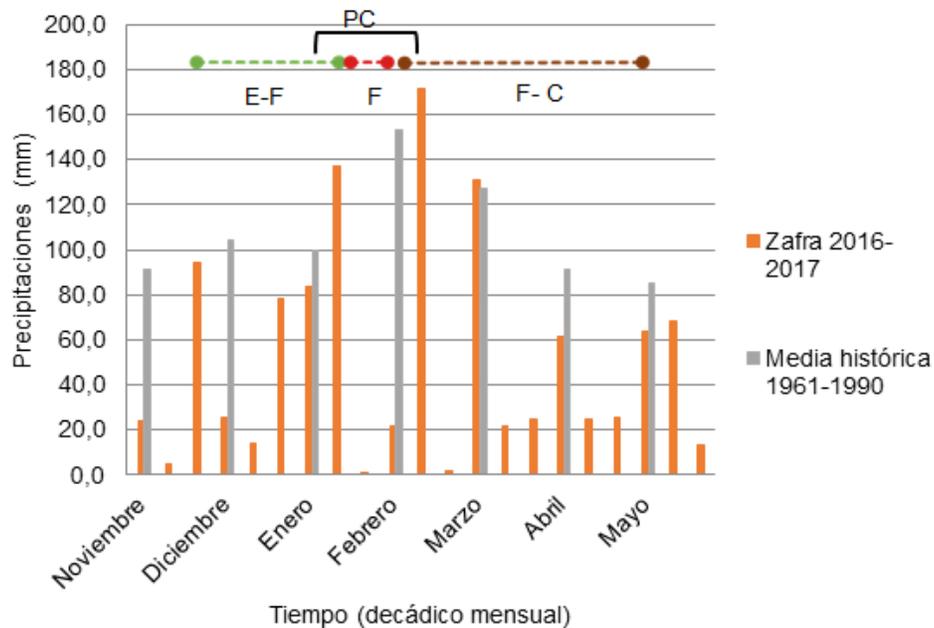
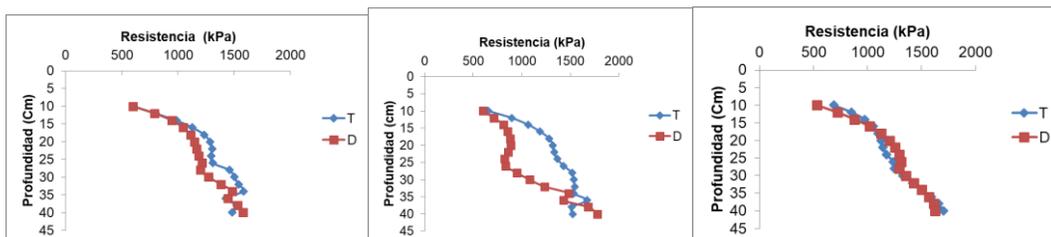


Figura No. 2. Precipitaciones entre noviembre 2016 y junio 2017, en comparación al período 1961 – 1990 y la ubicación temporal de las diferentes etapas del ciclo del cultivo.

Fuente: basado en registros de INIA. GRAS (2019)

Previo a ahondar en los resultados, para llegar a estos sin un sesgo fue necesario analizar los datos pluviométricos de la zafra del cultivo. Para un maíz sembrado el 30 de noviembre, se siembra el cultivo con un buen nivel de humedad de suelo dada las lluvias previo. Las lluvias posteriores hacen creer una buena implantación del cultivo, por lo tanto un buen stand de plantas. En los meses en donde el cultivo se encontraba en periodo crítico de rendimiento, donde se fija el número de grano, nuevamente se produjeron lluvias abundantes. Luego hasta el final del cultivo en el periodo de llenado de grano, nuevamente se vuelven a producir precipitaciones. Por lo cual, se cree que fue un año excepcional para el maíz.

4.2. PERFIL DE RESISTENCIA DEL SUELO

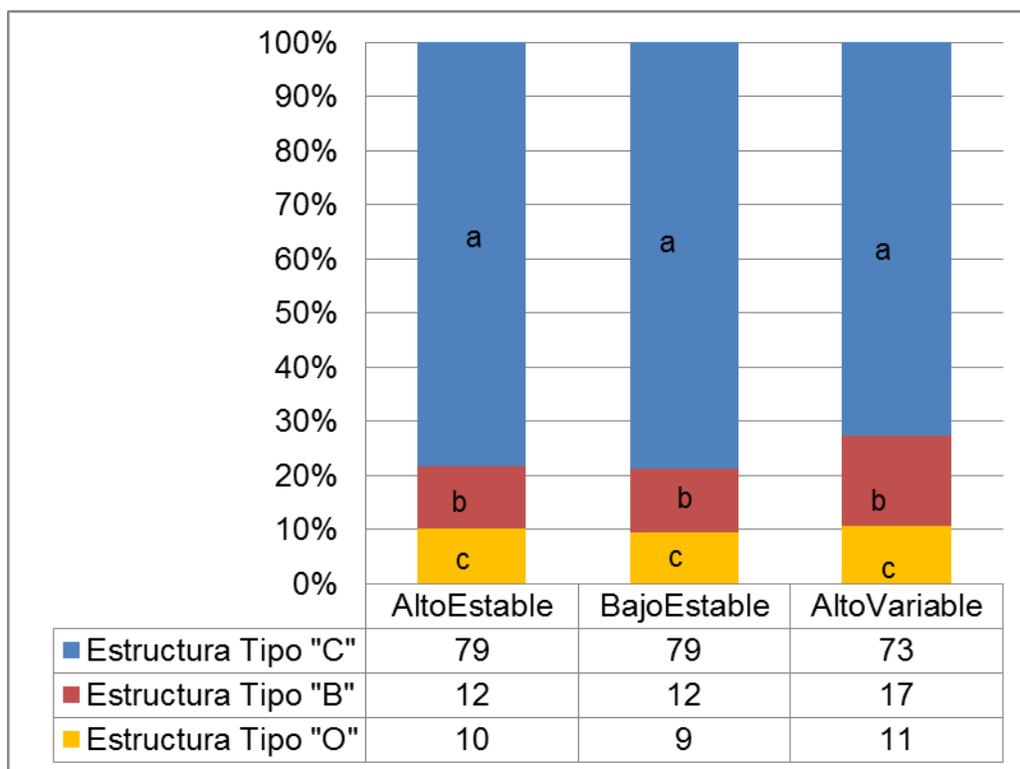


De izquierda a derecha, zona Alto_estable; zona Bajo_estable y zona Alto_variable.

Gráfico No. 1. Perfil de resistencia a la penetración para los primeros 40 cm del perfil del suelo para los tratamientos testigo (T) y descompactado (D).

La descompactación generó una reducción significativa ($P \leq 0,05$) en la resistencia a la penetración del suelo a partir de los 14 cm de profundidad sólo en la zona de rendimiento Bajo_estable. En el resto de las zonas la diferencia en resistencia a la profundidad no tuvo significancia estadística. Esta zona corresponde a la de mayor compactación, en especial en superficie.

4.3 PORCENTAJE DEL PERFIL DEL SUELO OCUPADO POR CADA TIPO DE ESTRUCTURA



Letras refieren a diferencias significativas entre zona dentro de tipo de estructuras.

Gráfico No. 2. Proporción de las diferentes estructuras de suelo dentro de las zonas estudiadas.

No se encontraron diferencias significativas en la proporción de las diferentes estructuras del suelo entre zonas, pero sí dentro de una misma zona. La mayoría del perfil de suelo presentó estructura "Tipo C", representando capas del suelo de estructura masiva. La proporción de estructuras Tipo O y Tipo B se ubicaron mayoritariamente en superficie, representando aproximadamente un 20% de la superficie total evaluada.

4.4 DENSIDAD APARENTE DEL SUELO POR TIPO DE ESTRUCTURA

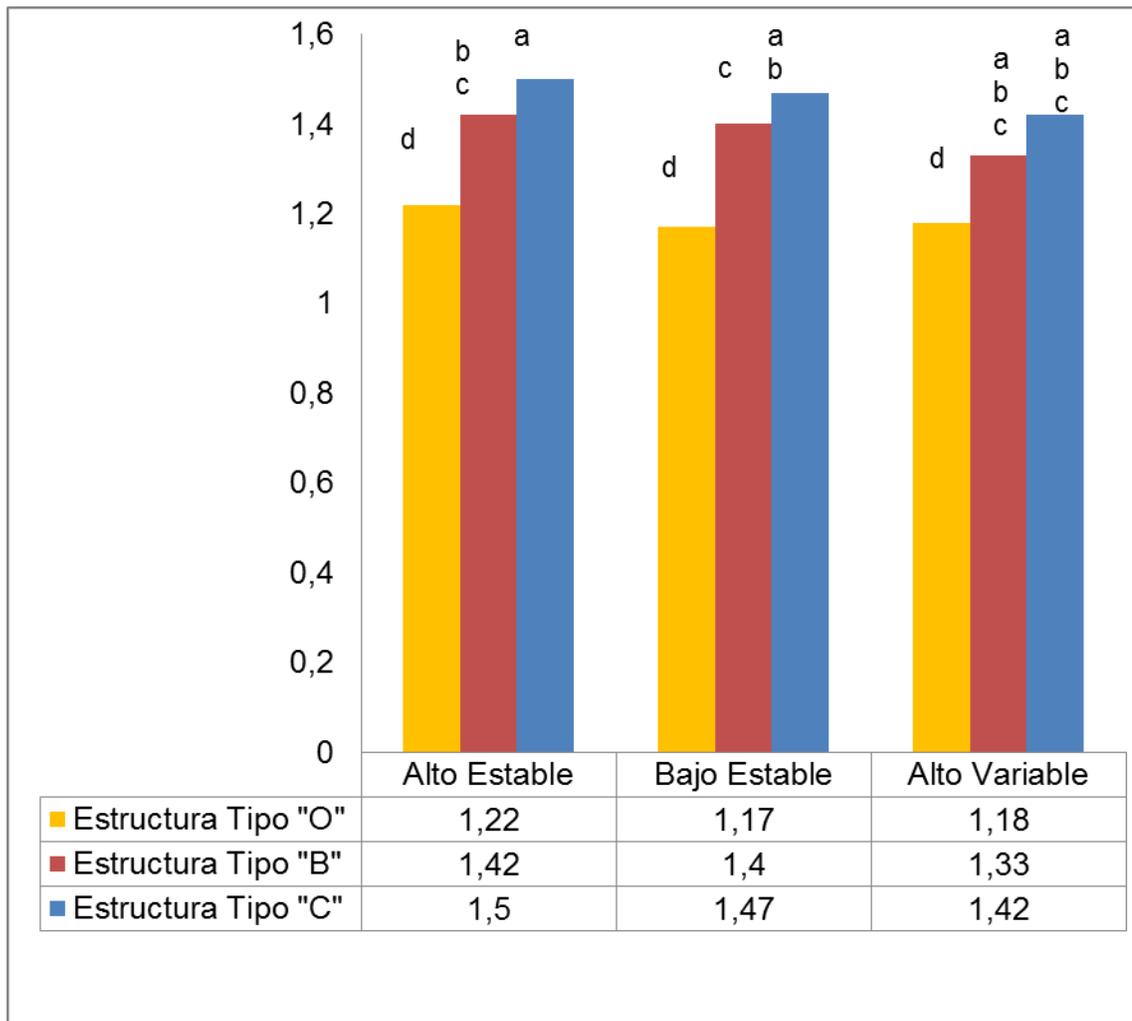
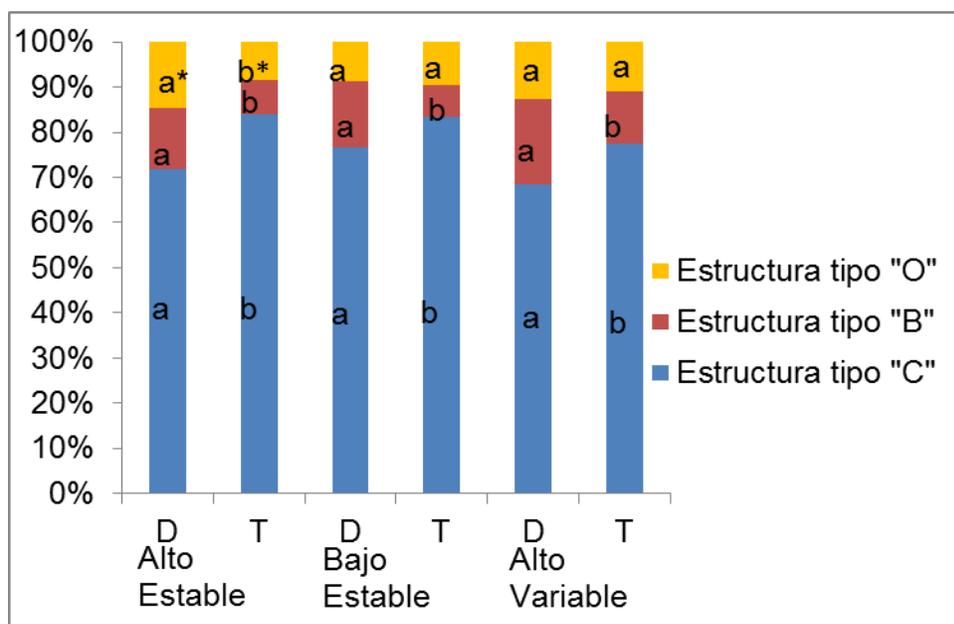


Gráfico No. 3. Densidad aparente de las diferentes estructuras dentro de las zonas estudiadas.

Existieron diferencias significativas ($p \leq 0,05$) en la densidad aparente del suelo agrupado por áreas calificadas por su tipo de estructura de agregados dentro de una misma zona. Este comportamiento se manifestó en todas las zonas por igual. A su vez, los tratamientos D determinaron menor densidad aparente que los T, lo que indica que el tipo de estructuras fue modificado por la descompactación subsuperficial.

Usando el gráfico de proporción de las diferentes zonas en conjunto con el gráfico de densidad aparente (Dap), se evidencia que la mayoría del perfil presenta estructuras que demuestran compactación en profundidad del suelo, incrementándose la de estructura Tipo "C", la que a su vez tiene una mayor densidad aparente.

4.5 PROPORCIÓN DE CADA ESTRUCTURA DENTRO DEL PERFIL SEGÚN TRATAMIENTO



Alto_estable (izquierda), Bajo_estable (centro) e Alto_variable (derecha). Valores con la misma letra dentro de tipo de estructura no difieren entre sí ($p \leq 0,05$). * $p \leq 0,11$

Gráfico No. 4. Proporción de agregados del suelo agrupados por tipo de estructura dentro del perfil en la zona de rendimiento según tratamiento.

En las zonas altoestable y altovariable, la descompactación subsuperficial mejoró la estructura de agregados del suelo, incrementando significativamente la estructura Tipo "O" ($p=0,11$) y "Tipo B" ($p \leq 0,05$). En tanto, en la zona bajoestable, se registró un efecto contrario y sin una explicación clara.

El tratamiento D redujo significativamente la proporción de estructura Tipo "C", representando en promedio el 79% en T contra 74% en el D y aumentó la proporción de las estructuras Tipo "B" en relación al testigo.

4.6. RESULTADOS DE LOS TRATAMIENTOS Y ZONAS SOBRE EL RENDIMIENTO

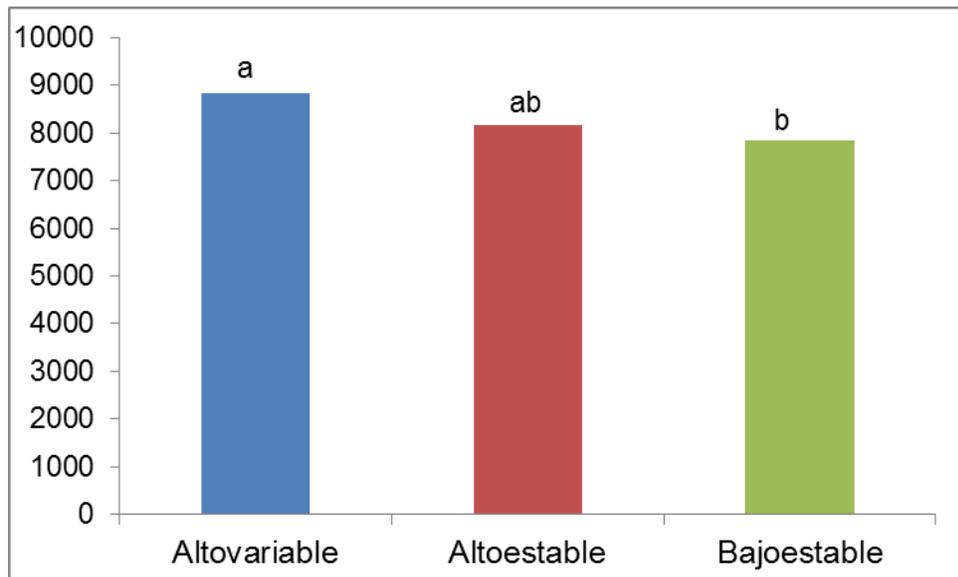


Gráfico No. 5. Efecto de las diferentes zonas sobre el rendimiento.

Los mayores rendimientos de maíz se lograron en la zona Alto_estable y Alto_variable, superando significativamente al logrado en la zona Bajo_estable.

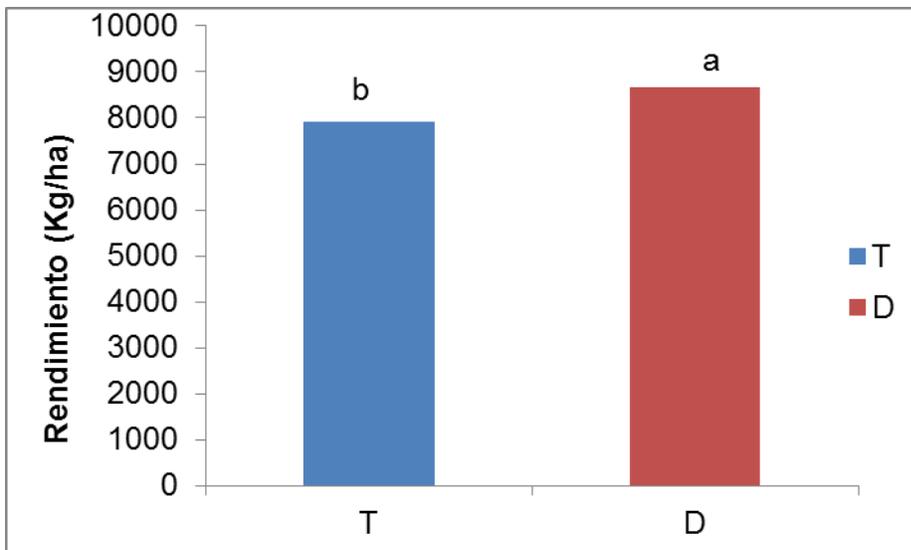
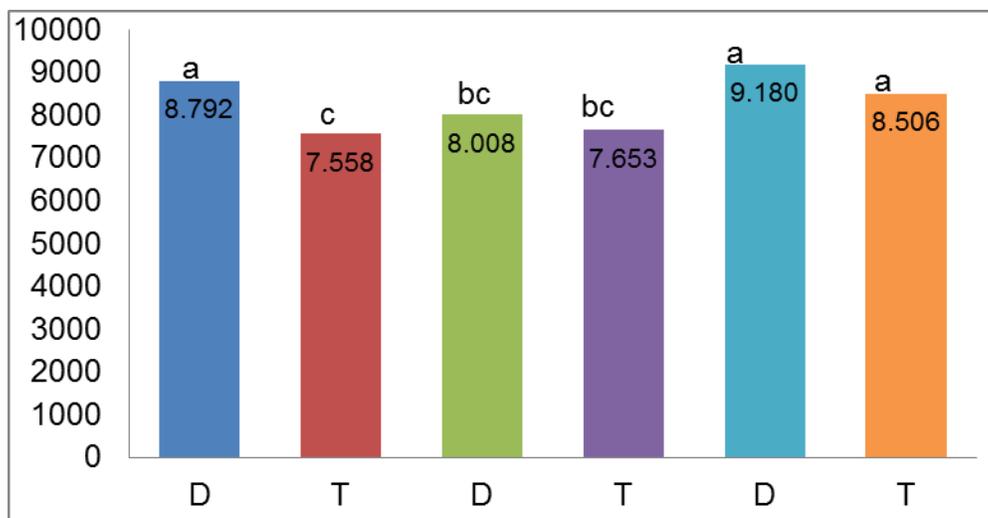


Gráfico No. 6. Efecto promedio de la descompactación sub_superficial sobre el rendimiento en grano de maíz.

La descompactación sub_superficial aumentó significativamente el rendimiento en grano de maíz, generando una respuesta positiva promedio de 754 kg ha⁻¹ (9%).



De izquierda derecha, zona alto estable, zona bajo estable y zona alto variable

Gráfico No. 7. Rendimiento en grano de maíz diferenciado por tratamiento y zona para un mismo año.

El rendimiento de la zona alto estable fue 1233 kg/ha mayor por efecto de la descompactación mecánica. La zona Alto_variable se mantuvo con

rendimientos superiores con respecto al resto de las zonas independientemente del tratamiento. La zona bajo estable no tuvo efecto significativo el uso de la herramienta.

5. DISCUSIÓN

El rendimiento de maíz varió acorde a las zonas definidas a partir del rendimiento de soja y su variabilidad interanual. Por tanto, estas zonas definidas por rendimiento en grano tuvieron el mismo comportamiento en soja y maíz, representando una alternativa válida para identificarlas. La descompactación resultó efectiva en reducir la resistencia a la penetración en la zona definida como de rendimiento de soja Bajo y estable (bajo en los dos años evaluados), demostrando la existencia de un efecto residual de por lo menos dos años.

Utilizando la descripción del perfil cultural como método para caracterizar variantes en la estructura del suelo entre zonas y tratamientos, si bien existieron diferencias significativas dentro de cada perfil evaluado, no existió un claro padrón entre zonas. Sí fue posible registrar una mejora significativa en la proporción de estructuras más favorables en respuesta a la descompactación, generando un cambio en la densidad aparente del suelo. Esto resulta que el suelo en estas estructuras (Tipo O y B) tuvo menor densidad aparente que en las "Tipo C". No obstante, el Tipo O y B se ubicaron en los primeros cm del suelo, representando un 20% del perfil estudiado. La descompactación mecánica redujo la proporción de Estructura Tipo C, ubicada mayoritariamente en profundidad. Por tanto, representativa de horizontes profundos, en particular, del Bt. La descompactación mecánica redujo significativamente este tipo de estructura, pero cuantitativamente la variación fue sólo de un 5% (79 contra 74% para T y D respectivamente). La baja respuesta podría atribuirse a que en este trabajo se cuantificó la respuesta residual a la descompactación realizada en el otoño del 2014 y del 2015. La ubicación (horizonte Bt) en el perfil del suelo de la Estructura Tipo C podrían explicar la escasa magnitud de la respuesta y su baja residualidad.

La resistencia a la penetración se vio afectada a partir de los 14 cm de profundidad en el perfil del suelo, lo que indica que esta descompactación en la zona y solo generó resultados en un área circundante a la púa de la herramienta (Gráfico No. 1). De todas maneras, Glinski y Lipiec (1990) establecieron que la resistencia a la penetración entre 2-3 Mpa no generan un problema para el crecimiento de raíces. En el mismo gráfico se puede observar que los valores máximos en este ensayo no entraron en la zona de "no crecimiento", confirmando así la hipótesis 1.

La información presentada en el Gráfico No. 2 se corresponde con resultados obtenidos por Caron (1992), Taboada (1998) quienes afirman que en el suelo se encuentra una alta proporción de estructuras masivas compactas, lo

que lo atribuyen al paso de maquinaria pesada, incluyendo la sembradora que es utilizada en múltiples oportunidades aun con humedad excesiva para el tráfico.

A pesar de la baja magnitud de la respuesta cuantificada en el suelo, se logró cuantificar un efecto significativo ($p \leq 0,05$) de la descompactación mecánica sub_superficial sobre el rendimiento de maíz. Este efecto fue en promedio de un 9%, pero variable según el ambiente. Mientras que en ambiente Alto_estable existió una respuesta de 1234 kg ha⁻¹, en el más limitante (Bajo_estable) fue de 355 kg ha⁻¹ y no existió respuesta en el ambiente Alto_variable, donde la variabilidad del rendimiento estaría generada por propiedades o atributos del suelo no directamente ligados a las propiedades físicas cuantificadas.

6. CONCLUSIONES

La resistencia mecánica a la penetración del suelo, el tipo de estructuras presentes dentro del perfil y su densidad aparente no fueron homogéneos espacialmente en el campo ni dentro del perfil del suelo.

Existió respuesta residual a la descompactación mecánica sub_superficial del suelo cuantificada como resistencia mecánica a la penetración del suelo y tipo de estructura.

La metodología propuesta por Gautronneau et al. (1987), ajustado para siembra directa por Boizard et al. (2016) permitió describir a simple vista el perfil completo del suelo y sus diferentes estructuras, así como las modificaciones impuestas por la descompactación mecánica sub_superficial.

La descompactación mecánica sub superficial del suelo redujo significativamente la proporción del perfil del suelo ocupado por estructuras tipo "C", reduciendo la densidad aparente de los agregados y, de esta forma, la del perfil.

El rendimiento de maíz se incrementó en promedio en un 9% en respuesta a la descompactación sub_superficial, pero de manera diferencial entre zonas.

7. RESUMEN

La agricultura en Uruguay es uno de los principales rubros exportadores y aporta un porcentaje muy elevado de capital al PBI nacional. En los últimos años, en busca de mejorar los resultados económicos, la agricultura ha transitado por un proceso de intensificación predominando los sistemas de producción con siembra directa y agricultura continua. Generando en el suelo un problema como la compactación excesiva del suelo por no generar un intercambio gaseoso con la atmósfera como los sistemas anteriormente utilizados en la agricultura. Para solucionar dicho problema se plantea la utilización de la herramienta de laboreo subsuperficial como es el paraplow. En este estudio se plantea que dicha herramienta puede solucionar los efectos de compactación que genera la siembra directa. El estudio fue realizado en la Estancia “Atalaya”, en el departamento de Soriano. El mismo cuenta de dos tratamientos: un testigo sin labranza (T) y descompactado mecánico subsuperficial (D), aplicado en dos años diferentes, otoño del 2014 (2014) y otoño del 2015 (2015), generándose los tratamientos T2014, D2014, T2015 y D2016. Los datos se obtuvieron en junio de 2017. A partir de datos obtenidos en diferentes estudios se generaron las tres repeticiones en base a rendimientos de los cultivos de soja de las zafras anteriores. A partir de dicho estudio se seleccionaron 6 sitios representativos de las zonas. Cada sitio abarcó un rectángulo de 2m por 1m por 40 cm compuestos por los tratamientos T y D apareados. En dichos sitios, se delimitaron zonas: tipo “O”, tipo “B” y tipo “C”. Se midieron las resistencias a la penetración verticalmente y perpendicular a la pared de la calicata. Se tomaron muestras de suelo para determinar la densidad aparente de estos. Todos los efectos del pasaje de la herramienta se ven evidenciados a partir de los 14 cm de profundidad. No se encontraron diferencias significativas de proporción de estructuras entre zonas, pero sí existen diferencias de estructura dentro de una misma zona, determinando así que la mayoría del perfil de suelo no presenta estructura granular o descompactada. Se evidencia que la mayoría del perfil presenta estructuras que demuestran compactación en profundidad del suelo ya que el porcentaje de estructura Tipo “C” es superior en conjunto con una mayor densidad aparente. En todos los lugares donde se pasó la herramienta se bajó la proporción de estructuras Tipo “C”, y aumentaron las estructuras Tipo “B” en relación al testigo. El pasaje del paraplow aumentó significativamente los rendimientos con una diferencia de 754 kg/ha (9%) entre los tratamientos a favor del descompactado.

Palabras clave: Agricultura; Suelo; Descompactación; Estructuras de suelo; Paraplow.

8. SUMMARY

Agriculture in Uruguay is one of the main export sectors and contributes a very high percentage of capital to the national GDP. In recent years, in search of improving economic results, agriculture has gone through a process of intensification, predominating production systems with direct sowing and continuous agriculture. Generating in the soil a problem such as excessive soil compaction due to not generating a gaseous exchange with the atmosphere like the systems previously used in agriculture. To solve this problem, the use of the subsurface tillage tool such as the paraplow is proposed. In this study, it is proposed that this tool can solve the effects of compaction generated by direct sowing. The study was conducted in the Estancia "Atalaya", in the department of Soriano. The same account of two treatments: a witness without tillage (T) and descompacted mechanical subsurface (D), applied in two different years, autumn 2014 (2014) and autumn 2015 (2015), generating the treatments T2014, D2014, T2015 and D2016. The data were obtained in June 2017. From data obtained in different studies the three repetitions were generated based on yields of the soybean crops of the previous harvests. From this study, 6 sites representative of the zones were selected. Each site covered a rectangle of 2m by 1m by 40 cm composed of the paired T and D treatments. In these sites, zones were delimited: type "O", type "B" and type "C". The resistance to penetration was measured vertically and perpendicular to the wall of the pits. Soil samples were taken to determine the apparent density of these. All the effects of the passage of the tool are evidenced from 14 cm deep. No significant differences were found in the proportion of structures between zones, but there are differences in structure within the same area, thus determining that the majority of the soil profile does not present a granular or descompacted structure. It is evident that the majority of the profile presents structures that demonstrate compaction in depth of the soil since the percentage of structure Type "C" is higher in conjunction with a greater apparent density. In all places where the tool was passed the proportion of Type "C" structures, and Type "B" structures increased in relation to the control. The passage of the paraplow significantly increased the yields with a difference of 754 kg / ha (9%) between the treatments in favor of the descompacted.

Keywords: Agriculture; Soil; Descompactation; Soil structure; Paraplow.

9. BIBLIOGRAFÍA

1. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echevarría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos. MAP. DSF. t.1, 96 p.
2. Álvarez, C.; Taboada M. A.; Gutiérrez, B.; Bustingorri, C.; Flavio, H.; 2006. Descompactación de suelos en siembra directa: efecto sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. Ciencia del Suelo (Argentina). 24: 1-10.
3. _____.; _____.; _____.; Bono, A.; Fernández, P. L.; Prystupa, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the rolling pampa region of Argentina. Soil Science Society of America Journal. 73: 1242–1250.
4. _____.; _____.; Morras, J. M.; Perelman, S. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampa, Argentina. Soil Research. 52: 533-542.
5. Bennie, A. T. P.; Krynauw, G. N. 1985. Causes, adverse effects and control of soil compaction. South African Journal of Plant and Soil. 2: 109-114.
6. _____.; Peigné, J.; Capowiez, Y.; Roger-Estrade, J. 2012. Ability of the “profil cultural” method to assess the soil structure of untilled layers. Agrociencia Uruguay, edición especial. 16 (3): 221-226.
7. Boizard, H.; Battista, J.; Cadoux, S.; Duparque, A.; Filho, J. T.; Franchini, J. C.; Guimaraes, M. F.; Heddadj, D.; Peigne, J.; Piron, D.; Ralisch, R.; Roger-Estrade, J.; Sasal, M. C.; Tomis, V.; Vian, J.F. 2016. Developments in the “profil cultural” method for an improved assessment of soil structure under no-till. Soil Research. 173: 92-103.
8. Borel, B.; Morras, H. J. M.; Bisaro, V. 2005. Modificaciones en la microestructura y la materia orgánica en un Argiudol bajo distintas

condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* (Argentina). 23: 1–12.

9. Botta, G. F.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Rossato, H. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic in ten sites; effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. *Soil and Tillage Research*. 78(1): 53-58.
10. _____; Agnes, D.; Flores-Parra, I.; Lastra-Bravo, J.; Laureda, D.; Martiren, V.; Ramírez-Roman, M.; Rivero, D.; Pelizzari, F.; Tolon-Becerra, A. 2016. Compaction produced by combine harvest traffic: effects on soil and soybean (*Glycine max* L.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. *European Journal of Agronomy*. 74: 155-163.
11. Caron, J.; Kay, B. D.; Stone, J. A. 1992. Improvement of structural stability of a clay loam with drying. *Soil Science Society America Journal*. 56: 15-83.
12. Chamen, W. C. T.; Moxey, A. P.; Towers, W.; Balana, B.; Hallet, P. D. 2015. Mitigating arable soil compaction: a review and analysis of available cost and benefit data. *Soil and Tillage Research*. 24: 359–380.
13. Díaz Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*. 54: 11-19.
14. Don, A.; Hennings, I.; Seidel, S; Schmittmann, O.; Schneider, F. 2017. The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil Research*. 174: 193-204.
15. Ernst, O.; Siri, G. 2011. La agricultura en el Uruguay, su trayectoria y consecuencias. In: Simposio Nacional de Agricultura (2º., 2011, Paysandú). No se llega, si no se sabe a dónde ir. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 149-163.
16. Etchegoimberry, P.; Izaguirre, R.; Ernst, O. 2017. Factores limitantes asociados a la variabilidad espacial y temporal del rendimiento de soja. In: Simposio Nacional de Agricultura (5º., 2017, Paysandú). Al futuro no se alcanza con llegar. Montevideo, Facultad de Agronomía. pp. 125-132.

17. Franzluebbers, A. J.; Endale, D.; Schomberg, H.; 2007. Surface soil responses to paraplowing of long term no tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil and Tillage Research*. 96: 303-315.
18. Gautronneau, Y.; Manichon, H., 1987. *Guide méthodique du profil cultural*. Lyon, GEARA. 71 p.
19. Glinski, J.; Lipiec, J. 1990. *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. Boca Raton, FL, CRC. 250 p.
20. Hamilton-Manns, M.; Ross, C. W.; Horne, D. J.; Baker, C. J. 2002. Subsoil loosening does little to enhance the transition to no-tillage on a structurally degraded soil. *Soil and Tillage Research*. 68 (2):109-119.
21. INIA. GRAS (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. Unidad de Agro-clima y Sistemas de Información, UY).2019. Estadística climatológica 1980-2009. (en línea). Montevideo. s.p. Consultado 10 ene. 2019. Disponible en <http://www.inia.uy>
22. Kay, B.; Vandenbygaart, A. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*. 66: 107-118.
23. 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.
24. Pagliai, M.; Marsili, A.; Servadio, P.; Vignozzi, N.; Pellegrini, S. 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research*. 73: 119- 129.
25. Sadras, V. O.; O'Leary, G. J.; Roget, D. K. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crop Research*. 91 (2-3):131-148.
26. Sasal, M. C.; Andriulo, A. E.; Taboada, M. A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*. 87: 9-18.

27. _____.; _____.; Boizard, H.; Leonard, J. 2016a. A contribution to understanding the origin of platy structure in silty soils under no tillage. *Soil Research*. 173: 42-48.
28. _____.; _____.; _____.; _____.; Wilson, M. 2016b. Platy structure development under no tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impacts on runoff. *Soil Research*. 173: 33-41.
29. Senigagliesi, C.; Ferrari, M. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *International Crop Science*. 1: 27-35.
30. Stengel, P.; Douglas, J.; Guerif, J.; Gross, M.; Monnier, R.; Cannel R. 1984. Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drill. *Soil and Tillage Research*. 4: 35-53.
31. Taboada, M. A.; Micucci, F .G.; Cosentino, D. J.; Lavado, R. S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 49: 57-63.
32. _____.; Barbosa, O. A.; Rodríguez, M. B.; Cosentino, D. J. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma*. 123: 233-244.
33. _____.; _____.; Cosentino, D. J. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Science*. 173: 130-142.
34. Tolón-Becerra, A.; Tourn, M.; Botta, G. F.; Lastra-Bravo, A. 2011. Effects of different tillage regimes on soil compaction, maize (*Zea mays* L.) seedling emergence and yields in the eastern Argentinean Pampas region. *Soil and Tillage Research*. 117:184-190.
35. Unger, P.W.; Kaspar, T.C. 1994. Soil compaction and root growth: a review. *Agronomy Journal*. 86: 756-766.

36. Vazquez, L.; Gallaher, R.; Hanlon, E.; Myhre, D.; Portier, K. 1989. Soil compaction associated with tillage treatments for soybean. *Soil Research*. 13: 35-45.