

Trabajo final de la carrera de Ingeniería Agronómica

Modalidad: Investigación



Título: Efecto de la labranza mecánica sobre las propiedades físicas del suelo y la productividad de maíz, trigo y soja.

Nombre: Martin Josefina Asunción.

DNI: 39292063

Número de legajo: 28050/0

Dirección de correo electrónico: josefinamartinagro@gmail.com

Teléfono: 2317559154

Director: Ing. Agr., M. Sc., Ph.D Agustin Pagani

Co-director: Ing. Agr. Nicolás Polich

Institución: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP.

Lugar de trabajo: CISSAF

CONTENIDO

Resumen	5
Abreviaturas.....	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Objetivos generales	12
1.1.2. <i>Objetivos específicos</i>	12
1.2. Hipótesis general	12
1.2.1. <i>Hipótesis específicas</i>	12
2. MATERIALES Y MÉTODOS	13
2.1. Área de estudio y tratamientos.....	13
2.2. Determinaciones primarias realizadas en el suelo	14
2.2.1. Resistencia mecánica a la penetración	15
2.2.2. Tasa de infiltración	15
2.3. Determinaciones secundarias sitio-específicas	16
2.3.1. Mapeo de la conductividad eléctrica aparente	16
2.3.2. Materia Orgánica	17
2.4. Determinación del Rendimiento	19
2.5. Análisis estadístico	19
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
3.1. Resistencia a la penetración e infiltración.	20
3.2. Resistencia a la penetración y variables secundarias sitio-específicas: CEa y MO 22	
3.3. Análisis de rendimiento.....	26
4. CONCLUSIONES	29
5. BIBLIOGRAFÍA.....	30

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño experimental de los dos experimentos en franja (lote 4 y 5) mostrando el tratamiento de Paratill y testigo apareado.	14
Figura 2. Diseño experimental de los dos experimentos en franja (Lote 4 y 5) mostrando las franjas del tratamiento de Paratill y el testigo apareado atravesando las dos zonas de conductividad eléctrica aparente (ECa) delineadas (mayores y menores a 15 mS m^{-1}).	17
Figura 3. Diseño experimental de los dos experimentos en franja (Lote 4 y 5) mostrando el tratamiento de labranza vertical y el testigo apareado atravesando las tres zonas delineadas en función del contenido de materia orgánica (MO, <3.0 , $3.0-3.6$ y $> 3.6\%$).	18
Figura 4. Resistencia a la penetración promedio en función de la profundidad del suelo para el tratamiento testigo y paratill. Las líneas horizontales representan los desvíos standard de la media. Letras distintas indican diferencias significativas. .	21
Figura 5. Resistencia a la penetración a diferentes profundidades de cada uno de los puntos de muestreo obtenidos en las franjas del tratamiento testigo en función del contenido de materia orgánica (MO) del suelo.	23
Figura 6. Resistencia a la penetración a diferentes profundidades de cada uno de los puntos de muestreo obtenidos en las franjas del tratamiento testigo en función de la conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo.	24
Figura 7. Resistencia a la penetración promedio en función de la profundidad del suelo para el tratamiento testigo y paratill para zonas dentro del lote con contenidos de materia orgánica (MO) menores y mayores a 3.3% . Las líneas horizontales representan los desvíos standard de la media. Letras distintas indican diferencias significativas.	25
Figura 8. Resistencia a la penetración promedio en función de la profundidad del suelo para el tratamiento testigo y paratill para zonas dentro del lote con valores de conductividad eléctrica aparente (ECa) menores y mayores a 15 mS m^{-1} . Las	

líneas horizontales representan los desvíos standard de la media. Letras distintas indican diferencias significativas. 26

Figura 9. Ejemplo de mapa de rendimiento de maíz 19/20 (Lote 5) y trigo 20-21 (Lote 4) mostrando el tratamiento de descompactación y el testigo apareado. 27

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tasa de infiltración promedio para el tratamiento de labranza vertical y el testigo. Letras distintas indican diferencias significativas..... 20

Tabla 2. Rendimiento de maíz, trigo y soja durante las campañas 19/20 (1er año) y 20/21 (2do año) en función del tratamiento de descompactación para el promedio de las franjas que atravesaron los lotes (análisis general) y para zonas contrastantes de materia orgánica (MO) y conductividad eléctrica aparente (ECa) del suelo en los dos ensayos (Lote 4 y Lote 5). 28

RESUMEN

En Argentina, la agricultura moderna se lleva a cabo bajo circunstancias y prácticas de manejo que pueden comprometer la salud física de los suelos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de una labor mecánica vertical sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento de maíz, trigo y soja en un sistema de alta producción bajo riego y siembra directa continúa utilizando tecnologías de agricultura de precisión. Se condujeron dos experimentos en franjas en un establecimiento agrícola del partido de Alberti, Provincia de Buenos Aires alternando un tratamiento de labranza vertical profunda y un testigo sin labrar. Se evaluó la resistencia a la penetración, la infiltración y el rendimiento de maíz, trigo y soja durante dos campañas en un análisis general y para zonas dentro del lote con niveles contrastantes de materia orgánica (MO) y conductividad eléctrica aparente (CEa). El tratamiento de labranza vertical produjo incrementos significativos sobre la velocidad de infiltración y, en forma menos consistente, sobre la resistencia a la penetración. El tratamiento paratill solo disminuyó ($P < 0.05$) la resistencia a la penetración respecto al testigo en el estrato de 7,5 a 22,5 cm de profundidad. No se encontraron asociaciones entre los patrones de compactación original del lote y la CEa aunque si se observaron correlaciones positivas con el contenido de MO que son difíciles de explicar y se consideran aleatorias. Se observó una tendencia a que el efecto de la labranza vertical sobre la resistencia a la penetración del suelo se manifieste más claramente en las zonas con mayor contenido de MO del lote. Se observaron respuestas en el rendimiento de maíz, trigo y soja que fueron bajas, inconsistentes y, en general, no significativas estadísticamente. Probablemente, los altos niveles de rendimiento alcanzados en este sistema de producción bajo riego enmascaren ciertos problemas físicos. Mas investigación es necesaria explorando un rango más amplio de variabilidad edáfica para confirmar los resultados obtenidos en este estudio.

ABREVIATURAS

ECa o CEa: Conductividad eléctrica aparente.

MO: Materia organica.

MPa: Mega pascales.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso con una velocidad de degradación rápida, en donde ocurren tasas de formación y regeneración extremadamente lentas (INTA, 2013). Dentro de las formas de degradación más comunes que ocurren en los suelos, se menciona a la compactación, la cual puede entenderse como la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa del suelo o reducción del espacio poroso entre los agregados, debido a fuerzas externas que actúan sobre él. La Soil Science Society, (1990) la define como “el proceso por el cual las partículas del suelo sufren un re arreglo, aumentando el contacto entre sí mismas, disminuyendo el espacio poroso e incrementando la densidad aparente” Este proceso de densificación provoca reducción de la porosidad del suelo, aumento de la resistencia mecánica y reducción en la conductividad hidráulica, lo que genera una reducción de la infiltración y por lo tanto un aumento del escurrimiento superficial, incrementando el riesgo de erosión (Quiroga et al., 2018).

Las raíces de las plantas son indicadores biológicamente sensibles y tienden a crecer más vigorosamente en las zonas que muestran menor resistencia física, por ejemplo, en los canales de las lombrices de tierra o en las grietas de contracción (Ehlers et al., 1983). Bengough et al., (2011) han encontrado que la tasa de elongación de raíces disminuye en la medida que aumenta la compactación del suelo, llegando a reducirse a la mitad cuando la resistencia a la penetración supera los 2 MPa. Estudios realizados por Forsythe et al., (2005) mostraron para el cultivo de maíz que la compactación genera un efecto en el rendimiento cuando se supera el valor crítico de 2,75 MPa. Por otra parte, Richmond & Rillo (2012) encontraron que la compactación, además de limitar el desarrollo y crecimiento de las raíces, provoca en aquellas que logran penetrar, deformaciones, estrangulaciones y otras anomalías morfológicas que alteran el sistema de conducción hacia la parte aérea.

Existen numerosas causas asociadas al problema de la compactación del suelo (FAO & GTIS, 2015) pero una de las principales es la labranza. El laboreo intensivo ha llevado a procesos de degradación de la calidad física de los suelos,

como la erosión, el encostramiento superficial y la formación de pisos de arado, entre otros (Morris et al., 2010). Esta forma de trabajar la tierra ha generado impactos negativos en el contenido de materia orgánica (MO) del suelo, lo cual afecta tanto a las propiedades físicas como químicas, disminuyendo la estabilidad estructural y afectando la adecuada dinámica del agua en el mismo. En este sentido, trabajos como el de Hernández et al 2019 en el partido de Patagones, concluyen que la pérdida de MO tiende a incrementar la densificación del suelo. Por otro lado, Quiroga et al., (2016) determinaron que, frente a una misma presión, un suelo que presenta menor contenido de MO es más susceptible a perder porosidad, resultando menos resistente y/o resiliente en relación a suelos que presentaron mayor contenido de MO.

Si bien la implementación de la siembra directa puede mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos puesto que contribuye a mantener o incrementar el nivel de carbono orgánico, mejorar la estructura y aumentar el contenido de agua del suelo, frecuentemente la SD se practica en sistemas agrícolas simplificados, lo que genera efectos negativos sobre la calidad física del suelo (Alvarez et al., 2009; Sasal et al., 2006). Si bien es esperable una mejor calidad estructural de la capa superficial del suelo bajo SD por mayor contenido de carbono orgánico y actividad biológica, frecuentemente se desarrolla una compactación poco profunda (10-20 cm), caracterizada por una alta resistencia mecánica (Álvarez et al., 2009a; Álvarez & Steinbach, 2009) y, a veces, valores de densidad aparente más altos (Álvarez & Steinbach, 2009). La SD con monocultivo, y especialmente con una alta frecuencia de soja, puede disminuir la estabilidad de los agregados del suelo, disminuir la macroporosidad y disminuir el carbono orgánico del suelo en comparación con una secuencia de cultivos más diversa (Kraemer et al., 2017; Novelli et al., 2013; Sasal et al., 2009). Se ha encontrado en la actualidad que en monocultivos hay una menor formación y estabilidad de agregados, además de observar una menor tasa de infiltración y menor conductividad hidráulica, lo que provoca una mayor pérdida de agua por escorrentía superficial.

A todo lo mencionado se suma que, con el avance tecnológico de la agroindustria metalmeccánica, se incorporaron al mercado equipos de mayor capacidad de trabajo con un incremento de su peso. Además, la agricultura moderna generalmente requiere de un mayor número de pasadas asociados a tratamientos de fertilización y protección del cultivo contra malezas, plagas y enfermedades, generalizando el problema (Gerster & Bacigaluppo, 2016). La investigación ha permitido demostrar que, con equipos más grandes y pesados y rodados más anchos, la compactación del suelo puede llegar hasta profundidades por debajo de la capa arable (20 cm) (Taboada & Micucci, 2002). A partir de estudios realizados por Smith & Dickson (1990), se conoce que la compactación de los estratos superficiales está causada por la presión específica (que está estrechamente correlacionada con la presión de inflado de las cubiertas), mientras que la compactación de los estratos más profundos (a más de 30-50 cm), está determinada solamente por la acumulación total de la carga, independientemente de la extensión de la superficie en la que se distribuye la misma. A diferencia de la compactación de la capa superficial del suelo, la compactación del subsuelo persiste durante años y puede causar reducciones permanentes del rendimiento de los cultivos.

Dentro de las propiedades físicas del suelo, la densidad aparente y la resistencia a la penetración son indicadores esenciales de la calidad física edáfica. La consideración de estas propiedades es útil para evaluar la aptitud del suelo para proporcionar un entorno adecuado para el desarrollo de las raíces, así como para prevenir reducciones del crecimiento y pérdidas de rendimiento de los cultivos (Glinski & Lipiec, 1990). Los poros mayores de 100 μm de diámetro equivalente son cruciales por su influencia en el crecimiento de las raíces (Gibbs & Reid, 1988). Las raíces pueden crecer dentro de los poros existentes cuando estos son más grandes que el diámetro de la raíz, agrandar los poros más pequeños o crear otros completamente nuevos. Por lo tanto, si el suelo inmediatamente alrededor del área de las raíces está compactado, se restringirá el crecimiento de las mismas (Gibbs & Reid, 1988; Glinski & Lipiec, 1990). En tales

condiciones, el crecimiento y el rendimiento de los cultivos pueden verse limitados, ya que se restringe el acceso a los recursos.

Debido a que las limitaciones por compactación subsuperficial del suelo están extendidas en todo el mundo, existe un gran interés en el uso de prácticas de descompactación a través de escarificadores (Ponce et al, 2016). Estas prácticas de labranza profunda generalmente reducen la resistencia a la penetración del suelo. Los principios de trabajo y roturación del suelo de los escarificadores para descompactación fueron descritos por Spoor & Godwin (1978) y por Spoor & Fry (1983). A niveles superficiales, el suelo es desplazado hacia adelante, arriba y lateralmente, bajo un patrón denominado de fallas crecientes, donde se producen fracturas a lo largo de planos definidos desde la punta de la reja hacia la superficie con una angulación aproximada de 45° respecto de la horizontal. Las rejas utilizadas para descompactar el suelo provocan su roturación, siempre que la condición del mismo sea friable (Guecaimburú et al., 2014). Dentro de ellos hay varios diseños, siendo el más utilizado en estos casos el Paratill, herramienta de montantes angulados de lámina recta.

El efecto de la labranza vertical sobre el crecimiento de las raíces y el rendimiento del cultivo es variable (Schneider et al., 2017) debido a la interacción entre las condiciones ambientales y las propiedades físicas del suelo. La resistencia a la penetración está inversamente relacionada con el contenido de agua del suelo, aunque suelos con altos contenidos de MO, tienen similar resistencia a la penetración con bajo contenido de agua y con alto contenido de agua. En un suelo compactado, cuando la disponibilidad de agua es restringida, el suelo se endurece limitando el crecimiento de las raíces, mientras que cuando el contenido de agua del suelo es alto, la resistencia a la penetración baja, pero la aireación puede verse afectada por la baja presencia de macroporos (Pilatti & Orellana, 2000). Por lo tanto, el rendimiento de los cultivos puede verse limitado por la compactación en condiciones de suelo muy seco o muy húmedo (Håkansson & Lipiec, 2000). En este contexto, se esperaría un mayor efecto de las

prácticas de descompactación sobre el rendimiento de los cultivos en condiciones de sequía moderada por las restricciones al acceso a los recursos del suelo (agua y nutrientes) en dichas circunstancias.

En los últimos años comenzaron a desarrollarse tecnologías para manejar la variabilidad espacial y temporal de los factores determinantes de la producción agrícola, a fin de incrementar los rendimientos, elevar la eficiencia del uso de los insumos y preservar la calidad ambiental (Pierce & Novak, 1999). El desarrollo de nuevas tecnologías, englobadas en el concepto de “agricultura de precisión”, como los sistemas de geoposicionamiento global (GPS), sistemas de información geográficos (GIS), monitores de rendimiento, sensores de suelo y cultivo, imágenes aéreas y satelitales, sistemas de aplicación variable, entre otros, transformaron en realidad la posibilidad de realizar un manejo sitio-específico de cultivos en una escala a la cual en el pasado era impracticable (Pagani, 2015). En este sentido, la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo ha sido una herramienta propuesta para la identificación y mapeo de la variabilidad edáfica, ya que está influenciada por una combinación de propiedades físico-químicas del suelo como la textura, MO y contenido de sales, que determinan su fertilidad e influyen sobre la productividad de los cultivos (Peralta et al., 2015; Sudduth et al., 1995). Una ventaja importante que posee este método, es que los patrones de distribución espacial de la CEa no cambian en el tiempo, por lo que las áreas delimitadas son temporalmente consistentes, aún bajo distintas condiciones de humedad del suelo (Farahani & Flynn, 2007; Sudduth et al., 2003;). Además, los muestreos de suelo densos como los esquemas sistemáticos en grillas de 1-2 ha han ganado popularidad en los últimos años en Argentina), sobre todo para el modelado de variables que no cambian en el corto plazo como la MO, el pH y la disponibilidad de fósforo.

Si bien es relativamente abundante la información generada respecto al uso de herramientas de descompactación sobre la productividad de los cultivos extensivos en la región pampeana, no se han realizado estudios nacionales que exploren la variabilidad espacial del problema de compactación dentro de un lote y la respuesta de los cultivos a la labranza vertical mediante el uso de tecnologías

de agricultura de precisión. Esta información podría potencialmente ayudar a los productores a realizar un mejor diagnóstico de los problemas físicos del suelo y abordarlos de una manera sitio-específica, minimizando labranzas innecesarias con implicancias económicas y ambientales negativas.

1.1. Objetivos generales

- Evaluar el efecto de una labor mecánica vertical sobre las propiedades físicas del suelo y la productividad agrícola en un sistema de alta producción bajo riego y siembra directa continua.

1.1.2. *Objetivos específicos*

- Estudiar el efecto de la labranza vertical sobre la resistencia a la penetración e infiltración de un suelo con aparentes problemas físicos.
- Evaluar el efecto de la labranza vertical sobre el rendimiento del cultivo de maíz, trigo y soja en un sistema de siembra directa continuo.
- Estudiar si variables secundarias sitio-específicas como el contenido de MO y la CEa del suelo contribuyen a explicar la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración y el efecto de la labranza vertical sobre la productividad de los cultivos.

1.2. Hipótesis general

La labranza mecánica en un suelo con problemas físicos, reduce la resistencia a la penetración, aumenta la infiltración y produce un aumento en el rendimiento de los cultivos.

1.2.1. *Hipótesis específicas*

- El uso de la labranza vertical en el suelo con niveles de resistencia a la penetración por encima de 2.5 MPa, produce un aumento en la productividad de los cultivos de maíz, trigo y soja.
- Las variables edáficas secundarias sitio-específicas como el contenido de MO y la CEa contribuyen a i) entender patrones de compactación y ii) explicar el efecto de la descompactación sobre la productividad de los cultivos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio y tratamientos

El estudio se realizó en el Establecimiento “La Lucia”, ubicado en el partido de Alberti, provincia de Buenos Aires (-60.3178; -35.1034) en un suelo Argiudol típico, perteneciente a la Serie O' Higgins. Se trató de un suelo muy oscuro y profundo de aptitud agrícola que se encuentra en un paisaje ondulado de antiguas lomas medanosas estabilizadas, en posición de loma de la Subregión Pampa Ondulada alta, bien drenado, desarrollado a partir de sedimentos loéssicos franco, no alcalino, no salino con pendiente de 0,5 a 1,0 % (INTA, 1996).

Durante el mes de Julio de 2020 se efectuó una labranza vertical en dos lotes del establecimiento (Lotes 4 y 5). Este tratamiento se realizó en franjas alternándolas con testigos sin tratar (Figura 1). Se realizaron nueve repeticiones en el Lote 5 y cinco en el Lote 4. El ancho de las franjas fue de 40 m y el largo correspondió a la longitud de cada lote (450 a 650 m) excluyendo cabeceras. La labranza se realizó con un descompactador de montantes angulados laterales rectos (Paratill) marca Dolby de 12 arcos dispuestos de forma encontrada a una profundidad de 40 cm. Las franjas fueron establecidas siguiendo la dirección en la que se lleva a cabo la siembra y la cosecha de los cultivos.

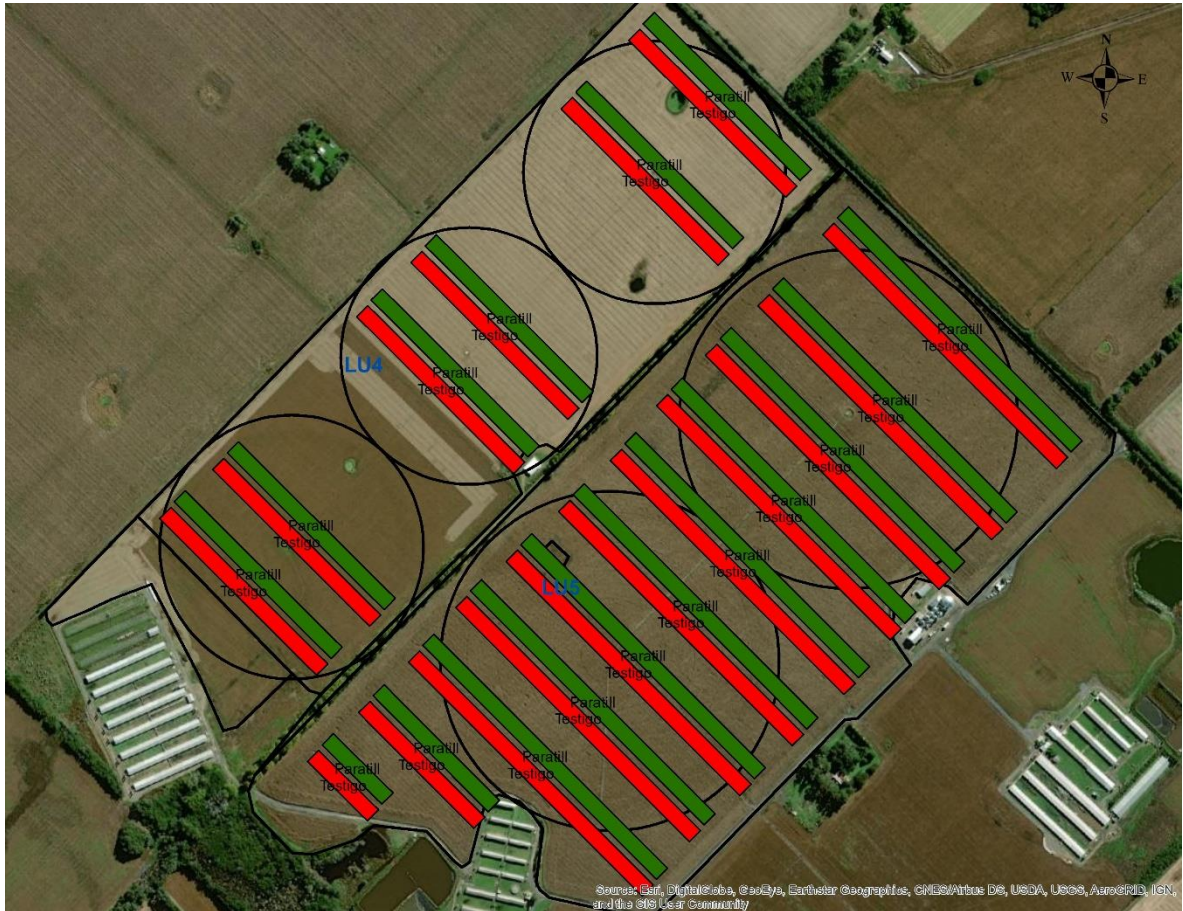


Figura 1. Diseño experimental de los dos experimentos en franja (lote 4 y 5) mostrando el tratamiento de Paratill y testigo apareado.

2.2. Determinaciones primarias realizadas en el suelo

Ambos lotes experimentales fueron georreferenciados mediante el software ArcGIS (Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA). Este programa fue además utilizado para el análisis de todas las fuentes de información georreferenciadas. Se generó una grilla de muestreo con una intensidad de un punto cada 1,6 ha (130 m x 130 m) que fue utilizada para determinaciones subsiguientes. Dichas grillas fueron exportadas en formato geoPDF a un dispositivo móvil con el software Avenza Maps 3.11.1 para realizar el trabajo de campo.

2.2.1. Resistencia mecánica a la penetración

La resistencia mecánica a la penetración se determinó en el Lote 5 con un penetrómetro digital Soil Compaction meter SC900 (Spectrum Technologies, Inc) de punta cónica de ½ pulgada de diámetro. Las determinaciones se llevaron a cabo en seis puntos de la grilla generada, tanto en las franjas tratadas como testigo en estratos de 2,5 cm hasta una profundidad de 45 cm. La humedad del suelo con la que se realizó el relevamiento, determinada gravimétricamente, fue de 63% de la capacidad de campo (datos no mostrados). Si bien este nivel de humedad se encontró por debajo de la condición óptima para un relevamiento de penetrometría (80-100% de capacidad de campo en términos ideales) y lo que los valores obtenidos pueden estar levemente sobreestimados, las comparaciones apareadas (paratill vs. testigo) siguen siendo de validez.

2.2.2. Tasa de infiltración

La tasa de infiltración se determinó con un infiltrómetro de tensión. Las determinaciones se llevaron a cabo en el Lote 5 en dos puntos de la grilla generada, tanto en las franjas tratadas como testigo, realizando cuatro repeticiones para cada tratamiento. Para garantizar un buen contacto hidráulico entre el dispositivo y el suelo, se extendió una delgada capa de arena seca sobre la superficie. Las determinaciones de infiltración se realizaron en tres valores de tensión del agua del suelo (-6 cm, -3 cm y 0 cm), aplicados en este orden y en el mismo lugar. El flujo de agua se controló hasta que se alcanzó el estado estacionario. La infiltración acumulada se registró en planillas donde se volcaron las lecturas de lámina de agua infiltrada (cm), a partir de dichas lecturas se calculó la tasa de infiltración (Ankeny et al., 1991).

2.3. Determinaciones secundarias sitio-específicas

2.3.1. Mapeo de la conductividad eléctrica aparente

En ambos lotes, se realizó un mapeo de la CEa del suelo utilizando la rastra Veris 3100® (Veris 3100, Division of Geoprobe Systems, Salina, KS). Este dispositivo de contacto que consta de 6 electrodos de metal en forma de discos que penetran aproximadamente 5 cm en el suelo. Los dos discos centrales emiten una corriente eléctrica continua y simultáneamente, los otros dos pares de electrodos detectan el gradiente de corriente, dado por transmisión a través del suelo (resistencia). Esta es una medida de la capacidad del suelo de conducir una corriente eléctrica (McNeill, 1992) que se relaciona con diversas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo entre las que se encuentran sales solubles, contenido y mineralogía de arcilla, contenido de agua, densidad aparente, estructura, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico y temperatura del suelo (Corwin & Lesch, 2005; Friedman, 2005). Cada lote se recorrió en dirección a los surcos de siembra en transectas paralelas distanciadas entre 20 m. Finalmente, los puntos de CEa fueron interpolados mediante el procedimiento de Krigging ordinario (Wackernagel, 1995) y se generaron dos zonas de CEa arbitrariamente definidas: zonas de CEa $< o >$ a 15 mSm^{-1} (Figura 2). Esta información fue utilizada para estudiar si existe algún grado de asociación entre variaciones en la textura del suelo (determinada indirectamente con el CEa) y los patrones de compactación y/o la respuesta en rendimiento a la labranza vertical.



Figura 2. Diseño experimental de los dos experimentos en franja (Lote 4 y 5) mostrando las franjas del tratamiento de Paratill y el testigo apareado atravesando las dos zonas de conductividad eléctrica aparente (CEa) delineadas (mayores y menores a 15 mS m^{-1}).

2.3.2. *Materia Orgánica*

En cada uno de los puntos de muestreo de la grilla generada se realizó un muestreo de suelo compuesto por 10 submuestras a la profundidad de 20 cm y se determinó el contenido de MO mediante el método de Walkley & Black (Walkley & Black, 1934). Mediante el procedimiento de Krigging ordinario (Wackernagel, 1995) se interpolaron los valores de MO de cada punto y se generaron dos o tres zonas de MO arbitrariamente definidas: zonas de MO mayor

2.4. Determinación del Rendimiento

En el Lote 4 se sembró soja durante la campaña 19/20 y trigo en la campaña 20/21 mientras que en el Lote 5 la secuencia de cultivos fue maíz y soja para dichas campañas. Los cultivos fueron conducidos bajo riego complementario mediante pivot central en ambas campañas (no se consideraron los datos de rendimiento fuera de los círculos de riego). Las demás prácticas de manejo referentes a la elección de la variedad o híbrido, fertilización, control de malezas, plagas y enfermedades fueron las normalmente empleadas por el productor del establecimiento. La cosecha de los cultivos se realizó con una cosechadora equipada con monitor de rendimiento y un sistema de posicionamiento global diferencial (DGPS). El mapa de rendimiento generado fue exportado al software ArcGIS para su posterior procesamiento y análisis. Se eliminaron los 50 m próximos a las cabeceras para excluir zonas de alto tránsito y áreas con rendimiento mayor o menor a 3 desvíos standard para eliminar valores extremos o outliers.

2.5. Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para determinar el efecto del tratamiento de labranza vertical sobre la resistencia a la penetración, la velocidad de infiltración y el rendimiento de maíz, trigo y soja utilizando el paquete estadístico Infostat. Para el caso del rendimiento, se analizó la información mediante tres análisis: i) utilizando el rendimiento promedio de cada franja, ii) analizando subregiones dentro del lote con valores altos y bajos de CEa (mayores y menores a 15 mS m^{-1} , respectivamente) y iii) analizando subregiones con altos, medios y bajos valores de MO (rangos de $<3,0$, $3,0-3,6$ y $>3,6\%$, respectivamente). Mediante análisis de regresión simple, se estudió la relación entre la resistencia a la penetración del tratamiento testigo y la CEa y la MO. Se utilizó un nivel de significancia del 5%.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resistencia a la penetración e infiltración.

El tratamiento de labranza vertical produjo incrementos significativos ($P < 0,05$) en la tasa de infiltración para las diferentes tensiones (Tabla 1). Las diferencias en los valores de infiltración de ambos tratamientos fueron mayores para las tensiones 3 y 6 que para la tensión 0 (agua libre) (Tabla 1). Estos resultados coinciden con los de Álvarez et al. (2021) quienes trabajando en suelos similares observaron incrementos importantes (de hasta 7 órdenes de magnitud) en la tasa de infiltración del suelo luego de una labranza vertical. La mayor tasa de infiltración puede explicarse por el aumento en la proporción de macroporos y mesoporos como consecuencia de la aplicación del escarificador (Bonel et al., 2004). En otro estudio realizado sobre suelos francos y franco-limosos manejados bajo siembra directa (SD) donde se observaron capas de 4 cm (entre 0 y 9 cm) con estructura laminar, con predominio de poros horizontales (Álvarez et al., 2014) y debajo de ellas, una estructura masiva de mayor densidad (Sasal et al., 2017), la descompactación mecánica de ambas capas mejoró la infiltración del agua en el suelo.

Tabla 1. Tasa de infiltración promedio para el tratamiento de labranza vertical y el testigo. Letras distintas indican diferencias significativas.

	Testigo	Paratill
	-----mm h ⁻¹ -----	
Tension 0	11,05 b	29,69 a
Tension 3	6,89 b	23,27 a
Tension 6	3,25 b	17,50 a

La curva de resistencia a la penetración en función de la profundidad en el tratamiento testigo pone en evidencia la presencia de una capa compactada de suelo superior a 2,5 MPa en el estrato entre 5 cm y 30 cm de profundidad y una capa especialmente densificada, superior a 3 MPa entre los 7,5 cm y los 22,5 cm (Figura 4). Estos valores de resistencia superan ampliamente al valor crítico de 2 MPa sugerido por Bengough et al. (2011) en donde se genera una reducción de la mitad de la tasa de crecimiento de las raíces.

El tratamiento de labranza vertical produjo una disminución generalizada en la resistencia a la penetración, aunque debido a la gran variabilidad de las observaciones, solo se detectaron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,05$) entre los estratos de 17,5 y 22,5 cm (Figura 4). Esta alta variabilidad en las franjas tratadas, probablemente se deba al efecto localizado del órgano de labranza, ya que la herramienta produce un área muy alterada en el suelo en el centro del dispositivo de labranza (órgano activo) y menor movimiento del suelo hacia los laterales.

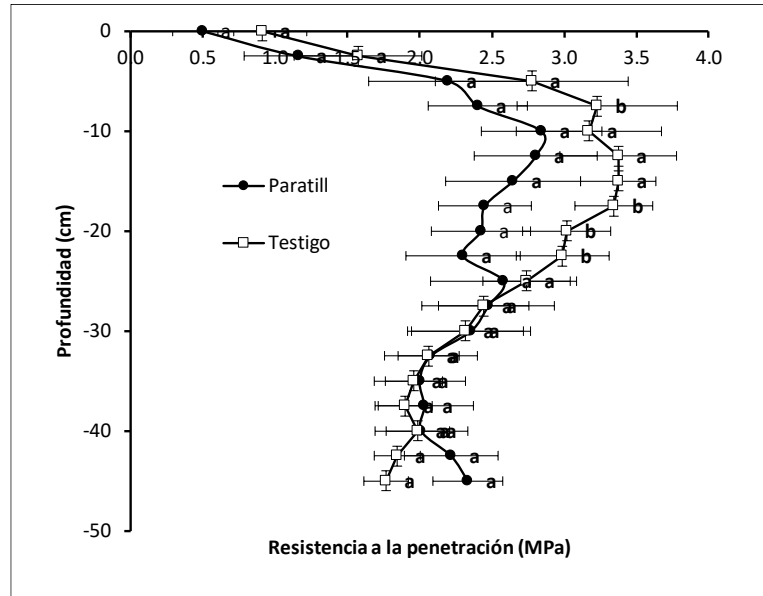


Figura 4. Resistencia a la penetración promedio en función de la profundidad del suelo para el tratamiento testigo y paratill. Las líneas horizontales representan los desvíos standard de la media. Letras distintas indican diferencias significativas.

3.2. Resistencia a la penetración y variables secundarias sitio-específicas: CEa y MO

Con el objetivo de evaluar si los patrones de compactación del lote tenían alguna asociación con el contenido de MO y/o la textura del suelo, se estudiaron relaciones entre la resistencia a la penetración original del lote (en el tratamiento testigo) a diferentes profundidades con el contenido de MO (Figura 5) y con la CEa (Figura 6).

Se observó una débil, pero significativa ($P < 0,05$) asociación lineal positiva entre la resistencia a la penetración original del suelo y el contenido de MO para los tres estratos inferiores, 10-20, 20-30 y 30-40 cm (Figura 6). En el estrato de 0-10 cm se observó un comportamiento de tipo lineal-plateau, ya que la resistencia a la penetración se incrementó linealmente con el contenido de MO hasta el valor de 3,38%, para mantenerse estable por encima de dicho valor. Estos resultados no son los originalmente esperados ni concuerdan con lo generalmente reportado en la bibliografía donde se mencionan las propiedades estructurantes de la MO como paliativo de los problemas físicos de los suelos (Álvarez, 2006). Probablemente, en lotes de producción con mayores rangos en el contenido de MO del suelo puedan observarse relaciones negativas entre la resistencia a la penetración y el contenido de MO del suelo en línea con lo reportado por (Quiroga et al., 2018).

No se observaron relaciones significativas entre la resistencia a la penetración original del suelo (medido en las franjas testigo) y la CEa en ninguno de los cuatro estratos evaluados (Figura 6). De manera similar a lo mencionado para el análisis anterior, es probable que se encuentren ciertas asociaciones entre determinaciones físicas asociadas a la porosidad del suelo como la densidad aparente, la resistencia a la penetración o incluso la infiltración con la CEa del suelo en lotes con mayores variaciones texturales. Por ejemplo, se ha mencionado que los suelos con mayor contenido de arcilla pueden experimentar problemas de

compactación más severos y restrictivos para el crecimiento radical que suelos de textura más gruesa (FAO, 2010).

Los resultados de este análisis indican que los patrones de compactación en lotes con historial y características edafológicas similares a los de este estudio no serían fácilmente predecibles o modelables usando variables relacionadas a la textura y al contenido de MO debido a un fuerte componente aleatorio en la distribución espacial de esta variable, fundamentalmente asociado con el tránsito de las maquinarias agrícolas.

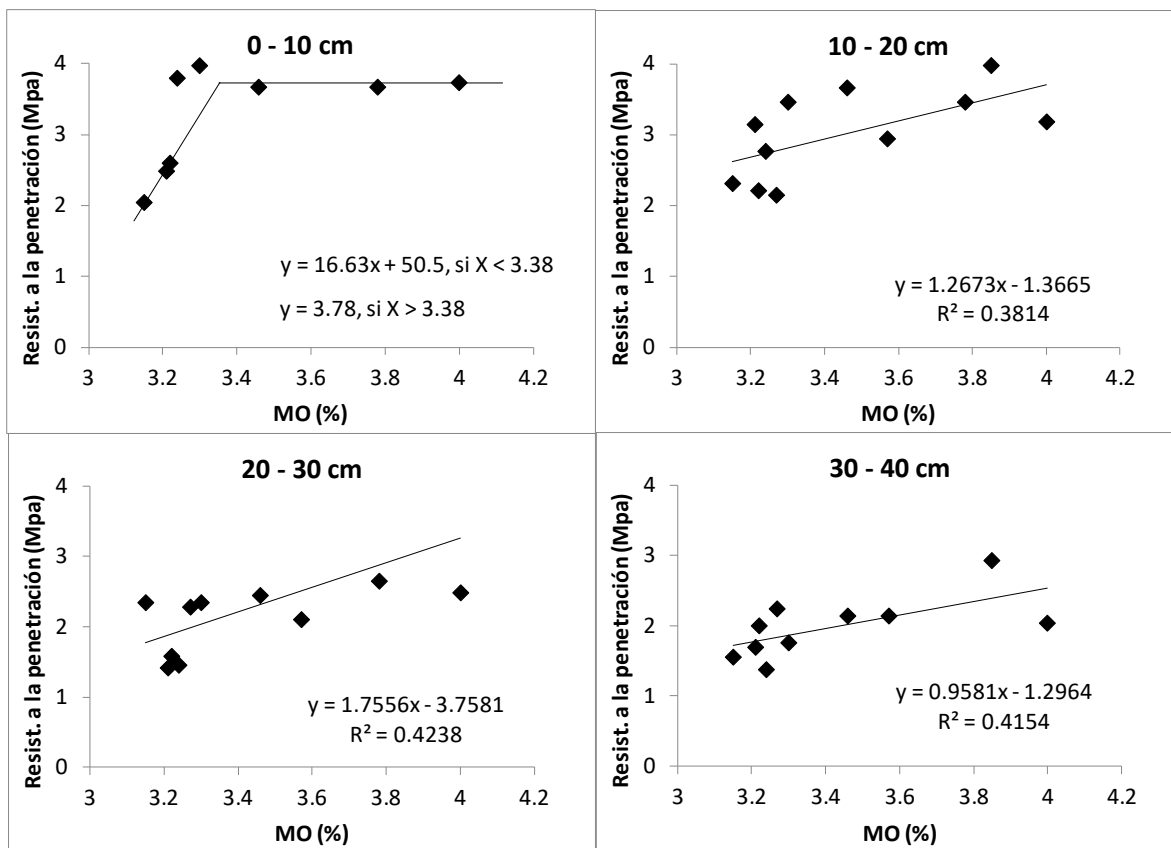


Figura 5. Resistencia a la penetración a diferentes profundidades de cada uno de los puntos de muestreo obtenidos en las franjas del tratamiento testigo en función del contenido de materia orgánica (MO) del suelo.

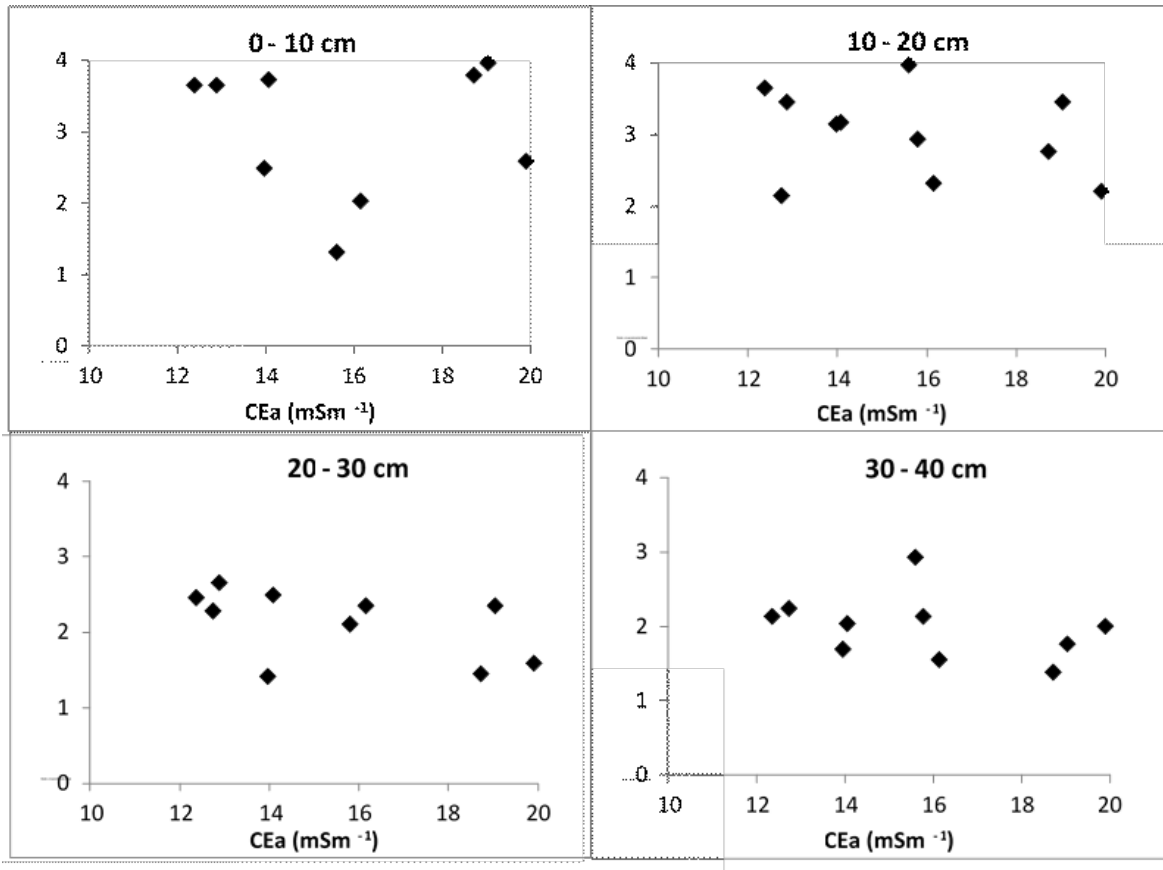


Figura 6. Resistencia a la penetración a diferentes profundidades de cada uno de los puntos de muestreo obtenidos en las franjas del tratamiento testigo en función de la conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo.

El efecto de la labranza vertical sobre la resistencia a la penetración fue mayor para las áreas del lote con MO > 3,3% (Figura 7). No se observaron diferencias significativas en la resistencia a la penetración del suelo entre los dos tratamientos para las zonas de menor contenido de MO, mientras que el paratill disminuyó significativamente esta variable ($P < 0,05$) entre los 15 y 22 cm de profundidad sugiriendo algún efecto favorable de la MO sobre la eficacia de la labranza vertical.

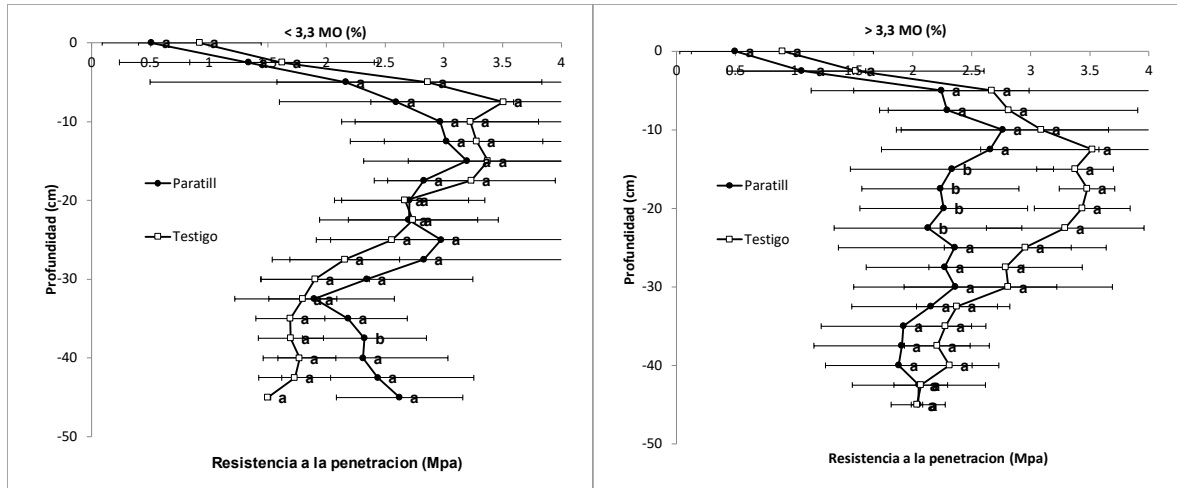


Figura 7. Resistencia a la penetración promedio en función de la profundidad del suelo para el tratamiento testigo y paratill para zonas dentro del lote con contenidos de materia orgánica (MO) menores y mayores a 3.3 %. Las líneas horizontales representan los desvíos standard de la media. Letras distintas indican diferencias significativas.

El análisis para áreas de CEa contrastantes no reflejó diferencias consistentes en el efecto del tratamiento de labranza vertical sobre la resistencia a la penetración (Figura 8). Si bien las zonas de CEa <math>< 15\text{ mSm}^{-1}</math> mostraron mayores valores iniciales de resistencia a la penetración (>3,5 Mpa para el tratamiento testigo entre 5 y 22 cm de profundidad), el tratamiento paratill no produjo reducciones estadísticamente significativas al igual que lo observado para la zona de mayor CEa, aunque con menores niveles de compactación iniciales (Figura 8).

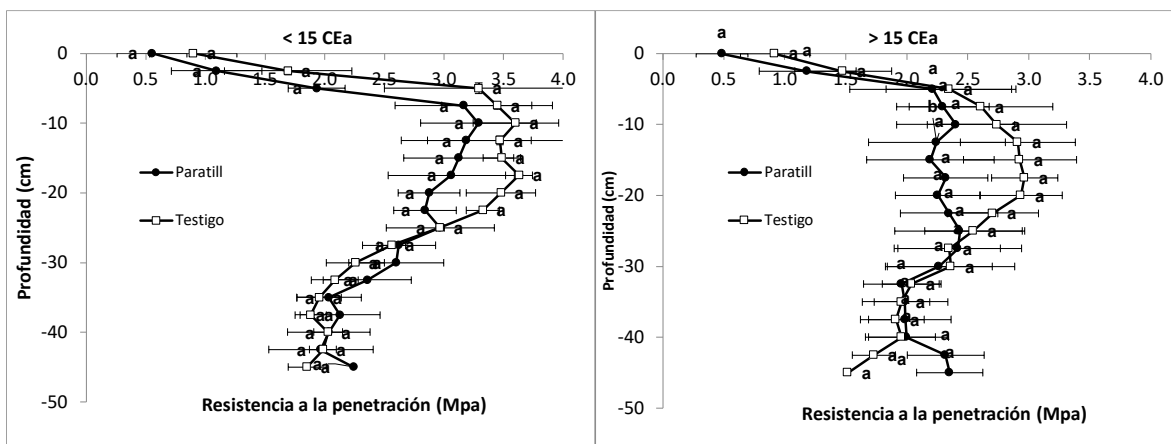


Figura 8. Resistencia a la penetración promedio en función de la profundidad del suelo para el tratamiento testigo y paratill para zonas dentro del lote con valores de conductividad eléctrica aparente (CEa) menores y mayores a 15 mS m^{-1} . Las líneas horizontales representan los desvíos standard de la media. Letras distintas indican diferencias significativas.

3.3. Análisis de rendimiento

Los rendimientos obtenidos durante las dos campañas evaluadas fueron elevados, variando entre 14435 y 14938, entre 6397 y 6644 y entre 3225 y 5078 kg ha^{-1} para maíz, trigo y soja, respectivamente (Tabla 2), por lo que escenario productivo explorado se considera representativo de esquemas intensivos de alta producción de la zona. El tratamiento de labranza vertical no generó incrementos significativos en los rendimientos de los cultivos (variando la respuesta entre -0.5 y 5,1% dependiendo del cultivo y análisis realizado), con la excepción del análisis de rendimiento realizado en función de la zona de CEa del Lote 5, donde el paratill produjo un incremento de rendimiento ($P < 0,05$) de 297 kg ha^{-1} (2,0%). No se observó interacción entre el tratamiento y la zona de MO o CEa generada (Tabla 2), sugiriendo que la respuesta a la labranza vertical sería independiente del nivel

de carbono orgánico o la textura del suelo (determinada indirectamente a través de la CEa), al menos en el rango explorado en este estudio.



Figura 9. Ejemplo de mapa de rendimiento de maíz 19/20 (Lote 5) y trigo 20-21 (Lote 4) mostrando el tratamiento de descompactación y el testigo apareado.

Tabla 2. Rendimiento de maíz, trigo y soja durante las campañas 19/20 (1er año) y 20/21 (2do año) en función del tratamiento de descompactación para el promedio de las franjas que atravesaron los lotes (análisis general) y para zonas contrastantes de materia orgánica (MO) y conductividad eléctrica aparente (CEa) del suelo en los dos ensayos (Lote 4 y Lote 5).

Sitio	Tipo de análisis	Campaña 19/20 (1er año)						Campaña 20/21 (2do año)					
		Cultivo	Rendimiento		Estadísticas (P > F)			Cultivo	Rendimiento		Estadísticas (P > F)		
			Testigo	Paratill	Tratamiento	Zona	Interacción		Testigo	Paratill	Tratamiento	Zona	Interacción
Lote 4	General	Soja	4796	4916	0.53	-	-	Trigo	6397	6456	0.10	-	-
	Zona MO												
	< 3.0 %		4934	5068	0.17	0.12	0.66		6416	6561	0.09	0.55	0.58
	3.0 - 3.6 %		4750	4781					6424	6454			
	>3.6%		4849	5078					6431	6644			
	Zona ECa												
	< 15 mS m ⁻¹		4777	4986	0.42	0.63	0.32		6401	6466	0.10	0.43	0.64
	> 15 mS m ⁻¹		4949	4925					6418	6535			
Lote 5	General	Maiz	14516	14686	0.26	-	-	Soja	4255	4399	0.79	-	-
	Zona MO												
	< 3.0 %		14435	14536	0.29	0.50	0.92		3225	3250	0.68	<0.01	0.97
	3.0 - 3.6 %		14647	14823					3728	3883			
	>3.6%		14596	14880					4579	4814			
	Zona ECa												
	< 15 mS m ⁻¹		14641	14938	<0.01	0.95	0.97		4259	4248	0.73	0.85	0.69
	> 15 mS m ⁻¹		14639	14927					4208	4395			

Los resultados obtenidos no son los originalmente esperados teniendo en cuenta los valores de resistencia a la penetración originales, observados en el tratamiento testigo (Figura 4). Sin embargo, otros estudios han sugerido que la

labranza profunda, a menudo, trae consigo mejoras significativas en los rendimientos en condiciones de estrés hídrico moderado, mientras que el efecto es bastante bajo o inexistente ante condiciones hídricas muy favorables (Sadras et al., 2005). Estos autores concluyen que, aunque se produzcan cambios en el grado de compactación del suelo y alteraciones en la abundancia radical de los cultivos, ello no implica necesariamente cambios en el rendimiento en grano, ya que, si hay suficientes recursos disponibles, por ejemplo, precipitaciones adecuadas o en condiciones de riego como en este estudio, los beneficios inherentes a la práctica de descompactación no se ponen de manifiesto. En este sentido, Håkansson & Lipiec (2000) concluyeron que la respuesta del cultivo al estado de compactación del suelo solo puede entenderse completamente si también se considera la dinámica de las condiciones de humedad a lo largo de la temporada de crecimiento.

En conclusión, puede inferirse que, en años con adecuada disponibilidad hídrica, como el evaluado, la práctica de descompactación tendrá un bajo impacto sobre el rendimiento y, probablemente, una escasa ventaja económica, si se considera el costo de la labor (Álvarez et al. 2006). Estos resultados deberán ser corroborados en un rango más amplio de condiciones hídricas y distintos grados de compactación, así como continuar con la evaluación de la perdurabilidad de la práctica de descompactación en los sitios estudiados.

4. CONCLUSIONES

El tratamiento de labranza vertical produjo incrementos significativos sobre la velocidad de infiltración y, en forma menos consistente, sobre la resistencia a la penetración. Solo se observaron diferencias en la resistencia a la penetración entre el tratamiento paratill y el testigo en el estrato de 7,5 a 22,5 cm de profundidad. No se encontraron asociaciones entre los patrones de compactación original del lote y la CEa aunque si se observaron correlaciones positivas con el contenido de MO que son difíciles de explicar y se consideran aleatorias. Se observó una tendencia a que el efecto de la labranza vertical sobre la resistencia a

la penetración del suelo se manifieste más claramente en las zonas con mayor contenido de MO del lote. A pesar de que el nivel de resistencia a la penetración original del lote se encontraba por encima de los umbrales sugeridos para el óptimo crecimiento radical de los cultivos, se observaron respuestas en el rendimiento de maíz, trigo y soja que fueron bajas, inconsistentes y, en general, no significativas estadísticamente. Probablemente, los altos niveles de rendimiento alcanzados en este sistema de producción bajo riego enmascaren ciertos problemas físicos. Mas investigación es necesaria explorando un rango más amplio de variabilidad edáfica para confirmar los resultados obtenidos en este estudio.

5. BIBLIOGRAFÍA

Alvarez, C., Bustingorri, C., Gutiérrez Boem & Hernán, F., Taboada, M.A. 2006. Descompactación mecánica de suelos bajo siembra directa: efecto sobre las propiedades físicas edáficas y el cultivo de maíz en la pampa ondulada. Disponible en [file:///c:/users/usuario/downloads/174-647-1-pb%20\(1\).pdf](file:///c:/users/usuario/downloads/174-647-1-pb%20(1).pdf)

Ultimo acceso: Junio de 2022.

Álvarez, C. R., & Steinbach, H. S. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Till. Res.*, 104, 1-15.

Álvarez, C. R., Taboada, M. A., Perelman, S. B. & Morrás, H. J. 2014. Topsoil structure in no-tilled soils in the Rolling Pampas, Argentina. *Soil Res.*, 52, 533-542.

Alvarez, C., Bustingorri, C., Gutiérrez Boem & Hernán, F., Taboada, M.A. 2021. Descompactación mecánica de suelos bajo siembra directa: efecto sobre las propiedades físicas edáficas y el cultivo de maíz en la pampa ondulada. Disponible en [file:///c:/users/usuario/downloads/174-647-1-pb%20\(1\).pdf](file:///c:/users/usuario/downloads/174-647-1-pb%20(1).pdf)

Ultimo acceso: Noviembre de 2022

Ankeny, M. D., Ahmed, M., Kaspar, T.C., Horton, R., 1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. J., pp: 55(2), 467-470.

Balbuena, R.H & Claverie, J.H. 2009. Descompactación mecánica del suelo.

Disponible en https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/26839/mod_resource/content/0/Curso_2011/maquinaria_2009/DESCOMPACTACION_MECANICA_DEL_SUELO

Ultimo acceso: Junio de 2022.

Bengough, A.G., B.M. mckenzie, P.D. Hallett, and T.A. Valentine. 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. Journal of Experimental Botany 62(1):59-68.

Bonel, B.A., Costanzo, M., Denoia, J., Giubileo, G & Zerpa G. 2004. Efecto de la labor de escarificado sobre un Argiudol Vertico bajo siembra directa continua. Cien. Inv. Agr. 31(3) pp:187-196.

Corwin DL, Lesch SM. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 46(1–3): 11 – 43.

Ehlers et al. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. pp: 10.

FAO. 2010. Diversas propiedades del suelo. Disponible en: https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s10.htm. Ultimo acceso: Junio de 2022.

FAO & GTIS. 2015. Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS) – Resumen Técnico. Disponible en: https://es.slideshare.net/agro_pe/fao-suelo-2015. Ultimo acceso: Enero de 2022.

Farahani H. y R. Flynn. 2007. Map quality and zone delineation as affected by width of parallel swaths of mobile agricultural sensors. Biosyst Eng. 96:151-159

Ferreras L, Magra G, Besson P, Kovalevski P & García F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?pid=S1850-20672007000200007&script=sci_arttext Ultimo acceso: Junio de 2022.

Forsythe W; Sancho F; Villatoro M. 2005. Efecto de la compactación de suelos sobre el rendimiento del maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3):175-185. **et al.** 2005. Disponible en: <https://pdfs.semanticscholar.org/4017/97d9e1fa477fdebe68356ffdeab171bc7fb1.pdf> Ultimo acceso: Junio de 2022.

Friedman SP. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46(1–3), 45-70.

Gerster, G. & Bacigaluppo, S. 2016. Disponible en: <https://2016.congresoaaapresid.org.ar/wp-content/uploads/2017/07/Gerster-Guillermo-acta.pdf>. Ultimo acceso: Junio de 2022.

Gibbs, R. J. y Reid, J. B. (1988). A conceptual model of changes in soil structure under different cropping systems. *Advances in Soil Science*, 8, 123-149

Giron P. 2012. Manejo sitio-específico de nitrógeno para el cultivo de maíz en el noroeste bonaerense. Disponible en: <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2021gironpaula.pdf>
Ultimo acceso: Junio de 2022.

Glinski, J. & Lipiec, J. (1990). *Soil Physical Conditions and Plant Roots*. Boca Raton, Florida, Estados Unidos: CRC Press Inc, 250 pp.

Hakansson, I. & Lipiec, J. A. (2000). Review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Res*, 53, 77-85.

Hernández H. J. 1 , Luna M. A.1 , Pesatti P. I.1 , Quichán S. A.1 Martínez R. M.1 González G. M. 2019. Estado físico-hídrico en suelos del partido de

patagones bajo distintos manejos de producción.
Disponible en:
[https://rid.unrn.edu.ar/bitstream/20.500.12049/4988/1/15%29%20Hern%
z%20H.J.%20et%20al.%2c%202019..pdf](https://rid.unrn.edu.ar/bitstream/20.500.12049/4988/1/15%29%20Hern%c3%a1nde z%20H.J.%20et%20al.%2c%202019..pdf)

Ultimo acceso: Noviembre de 2022.

Guecaimburú, J.M., R. Introcaso, J.M Vázquez, V. Rojo & G. Reposo. 2014.

Persistencia de la descompactación del suelo realizada con escarificadores de montantes angulados en sistemas de siembra directa. Disponible en https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/42992/CONICET_Digital_Nro.5b523933-d1f4-490b-a1b8-7b7996c06b95_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y. Ultimo acceso: Junio de 2022.

INTA. 1966. Carta de suelos de la Republica Argentina. Disponible en <http://anterior.inta.gov.ar/suelos/cartas/series/O'Higgins.htm>. Último acceso: Junio de 2022.

INTA. 2013. Labranza vertical: Efecto sobre un suelo compactado y el rendimiento de un ciclo trigo - maíz. Disponible en: https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta_informe_tecnico_siembra_22_labranza_vertical_efecto_sobre_un_suelo_compactado.pdf. Ultimo acceso: Enero de 2022.

Martin, G et al. 2019. Cambios en la resistencia mecánica de suelos con el uso del paratill en lotes de productores del partido de patagones. Disponible en: https://inta.gov.ar/sites/default/files/inta.ascasubi-efectos_uso_paratill_patagones.pdf Ultimo acceso: Junio de 2022.

McNeill JD. 1992. Rapid, accurate mapping of soil salinity by electromagnetic ground conductivity meters. En: Topp GC, Reynolds WD, Green RE. [Eds.]. Advances in measurement of soil physical properties: Bringing theory into practice. Madison : Soil Science Society of America. pp. 209 – 229.

Morris, N. L., Miller, P. C. R., Orson, J. H. y Froud-Williams, R. J. 2010. The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom

and the agronomic impact on soil, crops and the environment. A review. *Soil and Tillage Research*, 108, 1-15.

Novelli, LE; OP Caviglia OP; MG Wilson & MC Sasal. 2013. Land use intensity and cropping sequence effects on aggregate stability and C storage in a Vertisol and a Mollisol. *Geoderma* 195-196:260–267

Pagani, A. 2015. Manejo sitio-específico de nutrientes. En H.E. Echeverría and F.O. García (eds.) *Fertilidad de Suelo y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. Disponible en: <https://inta.gob.ar/noticias/nueva-publicacion-fertilidad-de-suelos-y-fertilizacion-de-cultivos> Ultimo acceso: Junio de 2022.

Peralta, N.R., Costa, J.L., Balzarini, M., Castro Franco, .M., Córdoba, M., Bullock D. 2015. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Comput. Electron. Agric.* 110:103-113

Pierce, F.J., Nowak, P. 1999. Aspects of precision agriculture. *Adv Agron.* 67 pp:1-85.

Pilatti, M. A. & de Orellana J. A. (2000). The ideal soil: II. Critical values of an “ideal soil” for Mollisols in the North of the Pampean Region (in Argentina). *J. Sustainable Agric.*, 17, 89-111.

Quiroga, A., Fernandez, R., Alvarez, C. 2018. Análisis y evaluación de propiedades físico hídrica de los suelos. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/analisis_y_evaluacion_de_propiedades_fisico_hidrica_de_los_suelos.pdf . Último acceso: Mayo de 2022.

Richmond, P. & Rillo, S. 2012. Evaluación del efecto de la compactación por el rodado de maquinarias sobre algunas propiedades físicas del suelo y el cultivo de trigo en siembra directa. Disponible en

[http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/02B1B9D56D66790A852579950079CF58/\\$FILE/6.pdf](http://www.ipni.net/publication/ialacs.nsf/0/02B1B9D56D66790A852579950079CF58/$FILE/6.pdf). Último acceso: Julio de 2020.

Sadras, V. O., O'Leary, G. J. y Roget, D. K. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.*, 91, 131-148.

Sasal, C; A Andriulo & M Taboada. 2006. Soil Porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in argentinian pampas. *Soil Till. Res.* 87(1): 9-18.

Sasal, M. C., Boizard, H., Andriulo, A. A., Wilson, M. C. y Léonard, J. 2017. Platy structure development under no-tillage in the northern humid Pampas of Argentina and its impact on runoff. *Soil Tillage Res.*, 173, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.014>.

Schneider, F., Don, A., Hennings, I., Schmittmann, O. y Seidel, S. J. (2017). The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil Till. Res.*, 174, 193-204.

Smith, D. & Dickson, J. 1990. Contributions of weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research.* 46 13 – 29

Soil Science Society of America (SSSA). 1996. Glossary of Soil Science Terms. Madison, Wi. USA. 134 pp Spoor, G & RK Fry. 1983. Soil disturbance generated by deep-working low rake angle narrow tines. *J. Agric. Engng. Res.* 28: 217-234.

Spoor, G & RJ Godwin. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *J. Agric. Engng. Res.* 23(3): 243-258.

Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Hughes, D.F., Drummond, S.T. 1995. Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils, Site-Specific Management for Agricultural Systems, American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. pp. 671-681.

Taboada, M & G. Micucci. 2002. Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía UBA. pp: 64.

Wackernagel, H. 1995. Ordinary Kriging. En: Multivariate Geostatistics. Springer, Berlin, Heidelberg. Disponible en: http://doi.org/10.1007/978-3-662-03098-1_11
Ultimo acceso: Junio de 2022.

Walkley & Black, 1934. stimation of soil organic carbon by the chromic acid titration method.

Disponible en: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkposzje\)\)/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=186446](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkposzje))/reference/ReferencesPapers.aspx?ReferenceID=186446). Ultimo acceso: Agosto de 2022.