

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN UN
INCEPTISOL DE TEXTURA GRUESA BAJO CULTIVO DE MAÍZ GRANO EN LA
ZONA MEDITERRÁNEA DE CHILE**

CARLA ANDREA SILVA ARAYA

SANTIAGO-CHILE

2015

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

MEMORIA DE TÍTULO

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN UN
INCEPTISOL DE TEXTURA GRUESA BAJO CULTIVO DE MAÍZ GRANO EN LA
ZONA MEDITERRÁNEA DE CHILE**

**SPATIAL VARIABILITY OF THE HYDRAULIC PROPERTIES IN A COARSE-
TEXTURED INCEPTISOL CULTIVATED WITH MAIZE IN THE
MEDITERRANEAN AREA OF CHILE**

CARLA ANDREA SILVA ARAYA

SANTIAGO-CHILE

2015

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**VARIABILIDAD ESPACIAL DE LAS PROPIEDADES HIDRÁULICAS EN UN
INCEPTISOL DE TEXTURA GRUESA BAJO CULTIVO DE MAÍZ GRANO EN
LA ZONA MEDITERRÁNEA DE CHILE**

Memoria para optar al Título
Profesional de Ingeniera Agrónoma

CARLA ANDREA SILVA ARAYA

PROFESORES GUÍA	CALIFICACIONES
Sr. Osvaldo Salazar Guerrero Ingeniero Agrónomo, Ph D.	7,0
Sr. Oscar Seguel Seguel Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,9
PROFESORES EVALUADORES	
Sr. Ricardo Cabeza Pérez Ingeniero Agrónomo, Ph D.	6,5
Sr. Nelson Díaz Pérez. Prof. Biología y Ciencias, Dr. en Ciencias	6,0

SANTIAGO-CHILE

2015

Sigue abriendo los caminos el surco de tu destino.
La alegría de sembrar no te la pueden quitar,
la alegría de sembrar es tuya, de nadie más

La Pala, Victor Jara (1970)

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores por todo lo entregado durante estos años, en especial a mis profesores Guías Oscar Seguel y Osvaldo Salazar por todo el tiempo dedicado, a los funcionarios: Don Gabriel Soto por cada viaje y a Don Hugo Pérez por toda su ayuda en el Laboratorio de Física de Suelos.

A la Cooperativa Campesina Intercomunal de Peumo (COOPEUMO), por permitir la realización de esta investigación.

A mis amigas y amigos por los hermosos recuerdos que me llevo del paso por esta casa de estudios, donde no solo llegamos a estudiar, sino que a construir universidad.

A mi fiel compañero que en estos días caminamos juntos en busca de nuestros sueños.

A todas y todos, gracias infinitas.

ÍNDICE

RESUMEN	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN	2
Objetivo general	4
Objetivos específicos.....	4
MATERIALES Y MÉTODO	5
Lugar de estudio	5
Materiales	6
Método.....	6
Medición de la conductividad hidráulica (K_{ns}).....	7
Medición de hidrofobia	8
Análisis estadístico	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
Propiedades generales de los suelos	11
Resistencia a la penetración (RP)	11
Textura.....	13
Densidad Aparente (D_a)	15
Contenido de Materia Orgánica del suelo (MO)	16
Propiedades de funcionalidad del suelo	18
Índice de Repelencia al agua (R).....	18
Conductividad hidráulica (K)	20
Conductividad hidráulica saturada (K_s).....	23
Correlación conductividad hidráulica (K) e hidrofobia (R)	24
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	27
ANEXOS	33
APÉNDICE	35

RESUMEN

La Región de O'Higgins, en la zona central de Chile, concentra el 40% de la producción de maíz del país, mayoritariamente como monocultivo, donde la labranza intensiva ha generado una degradación física del suelo que se manifiesta en procesos avanzados de compactación. El objetivo principal de este estudio fue evaluar la variabilidad espacial de propiedades hidráulicas de un suelo de textura gruesa (Typic Haploxerepts) bajo cultivo de maíz grano, asociándolas al estado de compactación y su dependencia con la hidrofobia del suelo. El estudio se realizó en un potrero de 2,9 ha bajo un sistema de producción maíz grano-barbecho bajo labranza convencional, ubicado en la Región de O'Higgins, Comuna de Pichidegua, entre los años 2013 y 2014. Se midió la resistencia a la penetración (RP), definiendo dos zonas de muestreo, denominadas como de alta RP y de baja RP. En cada zona se tomaron muestras dentro y fuera de la huella de tránsito del tractor y a dos profundidades, estableciendo cuatro tratamientos: No Huella- profundidad 0 cm (T1); No Huella- profundidad 30 cm (T2); Huella- profundidad 0 cm (T3); y Huella- profundidad 30 cm (T4). Se midió el contenido de materia orgánica (MO), textura, densidad aparente (Da), conductividad hidráulica (K) e hidrofobia (R). La caracterización física indicó que el suelo presenta una clase textural franco arenosa (7,4% arcilla), la RP varió de 0,2 a 2 MPa en superficie y de 0,6 a 2,4 MPa a 30 cm de profundidad (pie de arado) y el contenido de MO fue mayor en el sitio de baja RP, aunque sin diferencias estadísticas significativas ($\alpha > 0,05$) entre las posiciones dentro y fuera de la huella del tractor ni con respecto a la profundidad, al igual que para la Da y el índice de repelencia R. La K varió entre 0,6 y 18 cm h^{-1} , siendo mayor en profundidad debido a que la labranza destruye los macroporos del horizonte superficial generados durante la temporada de cultivo; no hubo relación con la posición respecto a la huella. Finalmente se encontró una relación lineal entre K y R, lo que permitió explicar las diferencias entre los sitios de alta y baja RP.

Palabras clave: Funcionalidad física del suelo, conductividad hidráulica, labranza convencional, resistencia a la penetración, hidrofobia.

ABSTRACT

O'Higgins Region in central Chile, accounts for 40% of the country's maize production, mostly as a monoculture, where intensive tillage has generated soil physical degradation such as soil compaction. The main objective of this study was to evaluate the spatial variability of soil hydraulic properties of a coarse-textured soil (Typic Haploxerepts) cultivated with maize, associated to the level of compaction and its dependence with the hydrophobicity. The experimental field (2,9 ha) is located in the central valley of Chile, and the experiment was carried out in the season 2013-2014, in a continuous fallow-maize system under conventional tillage. In a systematic sampling, penetration resistance (PR) was measured, defining two sampling areas, such as high and low PR. In each area soil samples were taken inside and outside of the wheel track and at surface and below the depths of plowing, establishing four treatments: Out track 0 cm depth (T1); Out track 30 cm depth (T2); In track 0 cm depth (T3); and In track 30 cm depth (T4). Soil organic matter (SOM), texture, bulk density (Db), hydraulic conductivity (K) and hydrophobicity (R) were measured. The physical characterization indicated that the soil has a sandy loam textural class (7.4% clay), the PR ranged from 0.2 to 2 MPa at surface and 0.6 to 2.4 MPa at 30 cm depth (plow pan), and the SOM content was higher in the site of low PR, but without significant statistics differences ($\alpha > 0.05$) between positions inside and outside the tractor track and with respect to depth, as well as the Db and the R repellency index. The K varied between 0.6 and 18 cm h⁻¹, being greater in deeper soil because tillage destroys the macropores generated at surface during the growing season; there were no relation of K respect the position (in, out) of the track. Finally, a lineal relationship was found between K and R, explaining the differences between high and low PR sites.

Keywords: Soil physical functioning, hydraulic conductivity, conventional tillage, penetration resistance, hydrophobicity.

INTRODUCCIÓN

La actividad económica de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins está fuertemente representada por la minería, seguido de las actividades manufactureras y las agropecuarias, destacando de esta última la producción de maíz y la crianza de cerdos y aves (INE, 2012). Más aún, el último Censo Agropecuario arroja que la producción de maíz corresponde al 78% del total de cultivos producidos en dicha región (INE, 2009). Además, datos recientes de INE procesados por ODEPA (2013) señalan que en esta zona se encuentra la mayor superficie sembrada a nivel nacional, superando a la Región del Maule y con un rendimiento promedio regional de 117 qqm ha^{-1} , el cual está por sobre el promedio nacional, que corresponde a 106 qqm ha^{-1} , pero bajo el rendimiento potencial que Pionner (2012) ha estimado en 220 qqm ha^{-1} .

En la Región de O'Higgins existe una asociación de pequeños productores agrupados en la Cooperativa Campesina Intercomunal de Peumo (COOPEUMO), quienes lideran un Acuerdo de Producción Limpia (APL) para el cultivo de maíz grano bajo un contexto de competitividad y desempeño ambiental, entre otras, manifestando su interés en aplicar sistemas de manejo que les permitan realizar una producción técnica y económicamente eficiente, apuntando hacia un mejoramiento ambiental (Salazar *et al.*, 2013). Dentro de este proyecto, se han analizado diferentes componentes que permitan describir e identificar problemas habituales que estén afectando al rendimiento de maíz, como deficiencias en el riego y la fertilización. Sin embargo, en el diagnóstico inicial de este APL, numerosos agricultores mencionaron que la labranza intensiva en el sistema de monocultivo de maíz podría haber generado problemas avanzados de compactación y escurrimiento superficial, lo cual podría estar favorecido por fenómenos de hidrofobia, desconociéndose la gravedad, distribución y variabilidad de estos problemas dentro de los campos de cultivo.

La labranza representa, sin duda, la perturbación más influyente en el suelo, con alteración de las propiedades físicas a causa de la aplicación repetitiva de sus labores, en un rango de profundidad que se extiende hasta decenas de centímetros (Strudley *et al.*, 2008). La compactación del suelo es uno de los principales efectos negativos de la agricultura moderna y se presenta en una amplia variedad de suelos y climas (Agostini *et al.*, 2012). Algunas clases texturales del suelo son más susceptibles a la compactación, especialmente aquellas con alto contenido de limo y arcilla (Álvarez y Steinbach, 2009). Según señala Strudley *et al.* (2008), los cambios en la distribución del tamaño de poros por efecto de la compactación generan alteraciones en la retención de agua y la conductividad hidráulica. Los cambios en estas propiedades hidráulicas afectan la tasa de infiltración y el agua disponible y, en consecuencia, se afecta el crecimiento de las raíces y el rendimiento del cultivo (Hamza y Anderson, 2005).

Para suelos con dominancia de partículas gruesas, el aumento en la densidad aparente por tránsito de maquinaria no necesariamente genera problemas en el movimiento del agua, ya que persisten macroporos entre las partículas gruesas (Horn, 2003). Sin embargo, existe el

riesgo de generar hidrofobia, que corresponde a la repelencia al agua por efecto principalmente de la materia orgánica, la cual se concentra en los puntos de contacto de las partículas sólidas y resulta especialmente crítico en suelos de textura gruesa (Urbanek *et al.*, 2007). Cuevas (2006) describe este fenómeno, desde el punto de vista de la degradación de suelos, como un proceso de alta relevancia, ya que su existencia se asocia a flujos preferenciales y escorrentía superficial. Es así como el exceso de labranza y la incorporación de residuos orgánicos en sistemas de producción de cereales puede traer asociados problemas de compactación e hidrofobia que dificulten la capacidad de transmitir fluidos en el suelo.

Cualquiera sea el problema físico generado por el exceso de labranza en suelos de textura gruesa, su caracterización se dificulta debido a la variabilidad espacial del suelo, lo que genera resultados de conductividad hidráulica y repelencia al agua con valores de coeficientes de variación mayores a 50% (Jury y Horton, 2004). Parte de esta variabilidad, si bien puede ser de origen natural, en suelos agrícolas se ve acrecentada por las labores propias de campo, como las labores culturales en la temporada o las zonas de tránsito (Pathak *et al.*, 2012), por lo que en el contexto de este estudio resulta necesario evaluar la conductividad hidráulica y su variabilidad dependiente de fenómenos de compactación e hidrofobia.

Objetivo general

Evaluar la variabilidad espacial de propiedades hidráulicas de un suelo de textura gruesa bajo cultivo de maíz grano, asociándolas al estado de compactación e hidrofobia del suelo.

Objetivos específicos

- Cuantificar espacialmente el estado de compactación del suelo (bajo la huella, fuera de la huella, en superficie y bajo la capa arable) a través de propiedades de funcionalidad física en zonas de alta y baja resistencia mecánica.
- Evaluar las propiedades hidráulicas (conductividad hidráulica, sorptividad, hidrofobia) en función de la variabilidad espacial del suelo y su dependencia de los procesos de compactación.

MATERIALES Y MÉTODO

Lugar de estudio

El estudio se realizó durante la temporada 2013-2014 en un sitio de 2,9 ha perteneciente a un asociado de la Cooperativa Campesina Intercomunal de Peumo (COOPEUMO), ubicado en el valle central de Chile, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins; específicamente en la Comuna de Pichidegua, en la localidad de San Luis (Figura 1). El suelo corresponde a terrazas aluviales no diferenciadas (CIREN, 1996), clasificado como Typic Haploxerepts (Inceptisol), con clases texturales que varían de franca en superficie a arenosa en profundidad. En el sitio de estudio se cultiva maíz de grano entre los meses de septiembre y marzo, mientras que el resto del año el suelo se encuentra en barbecho. En los Anexos I y II se entregan detalles de la morfología del suelo y sus principales propiedades.



Figura 1. A la izquierda Mapa de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins y sus Comunas. A la derecha, imagen satelital de San Luis (277399 E- 6192699 S), sitio experimental (Google Earth, datum WSG 1984).

La Comuna de Pichidegua se encuentra bajo un clima semiárido Mediterráneo. Presenta una temperatura media anual del aire de 14,6°C, máxima mensual de 26,3°C en el mes de enero y mínima mensual de 6,1°C en agosto. Las precipitaciones se concentran en los

meses de mayo a octubre y bordean una media anual de 550 mm, con una evapotranspiración potencial de 940 mm año⁻¹ (Uribe *et al.*, 2012).

Materiales

Para el análisis e identificación de la variabilidad de la compactación se utilizó un penetrómetro marca Eijkelkamp (modelo Penetrologger, Holanda), el cual trae incorporado un GPS y una memoria de almacenamiento de datos. La hidrofobia fue medida en el laboratorio de Física de Suelos de la Facultad de Ciencias Agronómicas mediante un equipo de sorptividad de fabricación propia, en tanto la conductividad hidráulica (K_{ns}) fue medida con un mini tensioinfiltrómetro Decagon Device modelo S (USA).

Método

El sitio experimental corresponde a un potrero de 2,9 ha (Figura 1), homogéneo en suelo y manejo. La producción de maíz grano se realiza bajo riego por surcos con un manejo de labranza tradicional, como describe Salazar *et al.* (2013). La preparación del suelo se efectúa inmediatamente después de la cosecha o antes de la siembra con un número de pasadas de tractor que varían entre 5 y 8 veces con implementos basados en arados y rastras de discos. En cuanto al manejo de rastrojos de la temporada anterior, este es consumido por bovinos mediante pastoreo directo y el remanente es incorporado al suelo.

En noviembre de 2013, con el cultivo de maíz en octava hoja, se caracterizó la variabilidad espacial de la resistencia a la penetración (RP) con Penetrologger, en una grilla regular de 30x30 m², poniendo precaución de no medir en zonas de huella de la maquinaria. El equipo dispone de un GPS, por lo que permitió ubicar espacialmente los puntos evaluados, de manera de interpolar los valores de resistencia mediante kriging, generando un mapa espacial de la RP. La medición se realizó después de un riego, con un contenido de agua cercano a capacidad de campo, con una penetración hasta 80 cm de profundidad.

Considerando que la infiltración de agua en el suelo es un proceso de superficie, y que las cargas mecánicas ejercen su mayor efecto en los primeros centímetros del suelo, se utilizó como criterio la resistencia entre 0-5 cm de profundidad, identificando en el potrero dos zonas con diferente resistencia a la penetración (alta y baja). En cada zona se delimitaron cuatro unidades experimentales de 1 m² para la evaluación de la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas, identificando posiciones dentro y fuera de la huella de tránsito de tractor y a dos profundidades: superficial y bajo la zona arable. Esto definió los tratamientos, indicados en el Cuadro 1, los cuales fueron evaluados bajo un diseño completamente aleatorizado (DCA), lo cual se detalla más adelante.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos.

Tratamiento	Descripción
T1	No Huella- profundidad 0 cm
T2	No Huella- profundidad 30 cm
T3	Huella- profundidad 0 cm
T4	Huella- profundidad 30 cm

Entre abril y mayo de 2014, previo a la preparación del suelo de la siguiente temporada, se realizaron mediciones en campo (conductividad hidráulica) donde se tomaron de cada zona (alta y baja resistencia) 4 tratamientos y 4 repeticiones, arrojando un total de 32 muestras. Con muestras colectadas a profundidades de 0-10 cm y 30-40 cm se midió la textura según el método del hidrómetro de Bouyoucos y la densidad aparente por el método del cilindro (Sandoval *et al.*, 2012), en tanto el contenido de materia orgánica (MO) se determinó por el método de calcinación (Sadzawka *et al.*, 2004). También se tomaron muestras de suelo no disturbadas del primer horizonte y bajo la zona arada, en cilindros de 5 cm de alto y 5,9 cm de diámetro para la determinación de la hidrofobia.

Medición de la conductividad hidráulica (K_{ns})

La K_{ns} se midió con mini tensioinfiltrómetro (Figura 2) a tensiones de 1, 2, 4 y 6 hPa según el método descrito por Zhang (1997). Estas mediciones se realizaron en terreno entre los meses de abril y mayo del año 2014.

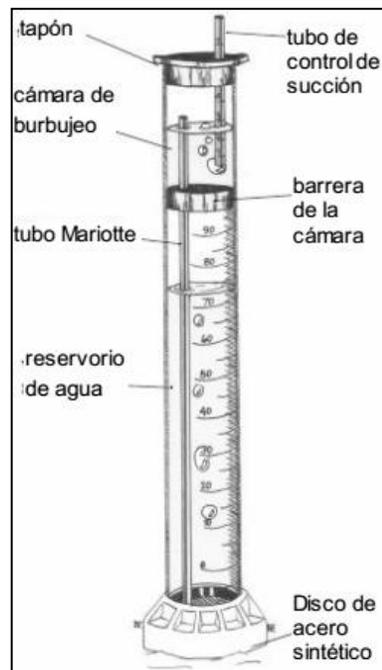


Figura 2. Diagrama del minidisco infiltrómetro Decagon Device modelo S.

El método propuesto consiste en medir la infiltración acumulada (cm^3) en función del tiempo, donde los resultados son ajustados con el valor A de van Genuchten (1980, Ecuación 1), dependiente de la textura y obtenido según Carsel y Parrish (1988). La superficie de infiltración es esencial para una medición correcta, por lo que utilizó una capa de arena fina para obtener una superficie de contacto homogénea. Las mediciones de altura de agua infiltrada se realizaron cada 30 segundos durante 10 minutos, dada la alta velocidad de infiltración que posee el suelo del estudio.

$$A = \frac{11,65(n^{0,1} - 1)e^{[2,92(n-1,9)\alpha h_0]}}{(\alpha r_0)^{0,91}} \quad n \geq 1,9 \quad (\text{Ec. 1})$$

$$A = \frac{11,65(n^{0,1} - 1)e^{[7,5(n-1,9)\alpha h_0]}}{(\alpha r_0)^{0,91}} \quad n < 1,9$$

Donde n y α son los parámetros de ajuste de van Genuchten (1980), r es el radio del disco y h es la tensión aplicada. Para suelos de clase textural conocida, existen los valores de A tabulados en función de la tensión de suministro (Carsel y Parish, 1988)

El procesamiento de datos consistió en convertir el volumen en altura de agua infiltrada, esto restando la lectura del volumen de partida y dividiendo por el área del disco ($15,9 \text{ cm}^2$). Luego se graficó la infiltración acumulada (IA) como altura de agua en función de la raíz del tiempo para obtener, en base a una regresión cuadrática, la curvatura (C1) de la parábola a tensiones de 1, 2, 4 y 6 hPa, para así obtener la K_{ns} según la ecuación 2.

$$K_{ns} = \frac{C1}{A} \quad (\text{Ec. 2})$$

Con la distribución de K_{ns} en función de la tensión de suministro, se realizaron ajustes lineales para extrapolar la conductividad hidráulica saturada (K_s) a tensión cero.

Medición de hidrofobia

La presencia de hidrofobia se evaluó mediante el índice de repelencia (R) según la metodología que describe Tillman *et al.* (1989), a partir de la infiltración de dos líquidos en un permeámetro hermético. Para ello se realizaron mediciones de sorptividad, donde las muestras fueron expuestas a un flujo de agua destilada y luego a un flujo de etanol al 95%, sobre muestras colectadas en cilindros secos al aire. Para esta evaluación se utilizó el dispositivo desarrollado por Leeds-Harrison *et al.* (1994), que consta de una red de capilares (Figura 3) que conducen líquido desde un recipiente hacia la muestra de suelo, la cual provoca una succión que hace avanzar el líquido.

En el dispositivo, el líquido (agua o etanol) infiltra en el suelo a través del capilar de 4 mm de diámetro, en cuyo extremo se adhiere una esponja que permite un mejor contacto con el suelo por ser ambas superficies rugosas, estableciéndose en el extremo una presión negativa (h) de 1 cm de columna de agua o -1 hPa. El recipiente que contiene el líquido se sostiene sobre una balanza de precisión que registra la diferencia de peso en la medida que el suelo absorbe agua o etanol, según corresponda.

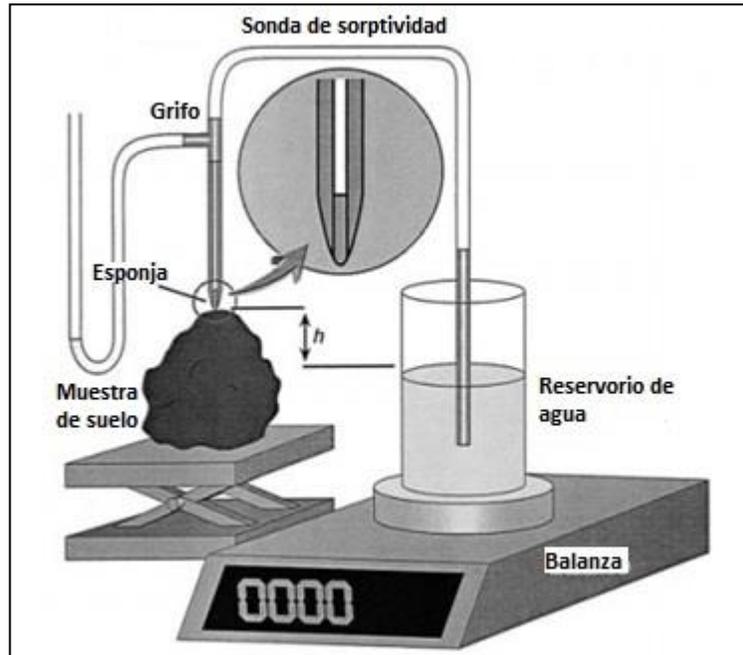


Figura 3. Dispositivo desarrollado por Leeds-Harrison *et al.* (1994). Imagen de Hallet y Young (1999).

En esta evaluación, en primer lugar, se hizo infiltrar agua y luego de secar nuevamente esta muestra al aire y en un sector distinto se hizo infiltrar etanol. Se midió cada 15 segundos la infiltración de cada líquido, hasta completar 75 segundos y, a partir de la densidad de cada líquido, se determinó el volumen infiltrado final. Con los datos registrados se graficó el volumen de agua en función del tiempo, obteniendo el caudal de entrada de líquido. A partir de ello se estimó la sorptividad en agua y etanol considerando un capilar de 4 mm de diámetro, factor $b= 0,55$ y $f= 1,0$ de acuerdo a lo propuesto por Hallet y Young (1999), determinando el índice R mediante la Ecuación 3. Se consideró un suelo hidrófobo si los valores de R son mayores a 1,95 e hidrófilico si este es menor a 1,95 (Tillman *et al.*, 1989).

$$R = 1,95 * \left(\frac{S_e}{S_w} \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde S_e corresponde a la sorptividad en etanol, S_w a la sorptividad en agua y 1,95 se debe a la constante que considera las propiedades del agua y del etanol (viscosidad, tensión superficial).

Análisis estadístico

En primer lugar, se generó un mapa de resistencia a la penetración (RP) para determinar las zonas contrastantes de alta y baja RP; para ello se realizó una interpolación lineal con kriging mediante el software Surfer 10. En base a las zonas determinadas de alta y baja RP, se realizó un diseño completamente aleatorizado (DCA) con dos componentes: la posición de la huella del tractor (dentro y fuera de esta) y la profundidad en superficie y bajo la zona arada; con 4 repeticiones en cada zona contrastante de RP (Cuadro 1). Para determinar el efecto tratamiento, mediante el uso del programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2005) se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de confianza del 95% y en casos donde se encontraron diferencias significativas, se procedió a analizar los tratamientos mediante la prueba de comparaciones múltiples de la Mínima Diferencia Cuadrática (LSD) ($\alpha \leq 0,05$).

Dado que la conductividad hidráulica (K) es una propiedad altamente variable, se desarrollaron para efectos de este estudio, dos modelos de criterio estadístico para evaluar dicha propiedad. En primer lugar, se determinaron los resultados en base a una Regresión Lineal, que relacionó la K_{ns} promedio de las repeticiones de cada tensión versus la tensión de suministro, para obtener así las rectas de ajuste de manera de establecer diferencias entre tratamientos a través de una prueba *t*, comparando de a parejas las pendientes e interceptos de los ajustes. El segundo análisis se realizó con todo el set de datos (4 repeticiones y cuatro tensiones, $n=16$), estabilizando varianzas y normalizando distribuciones, cuando la variable no posee distribución normal y por lo tanto no se cumplen los supuestos para errores (Mangeaud y Videla, 2005). Este análisis alternativo correspondió a un Modelo Lineal General Mixto (MLGM) el cual proporciona un entorno óptimo para responder estudios con diseño experimental más o menos complejos (Badiella, 2011).

El MLGM consiste en corregir las rectas lineales obtenidas en base a una ecuación prima obtenida de uno de los cuatro tratamientos (en este caso de estudio). Esta ecuación prima corresponderá al primer tratamiento que se registre en el software Infostat. Dicho software entrega la información en un cuadro donde aparecen el intercepto al eje Y y la pendiente de la ecuación prima (en este caso T1), más los valores de corrección de esta ecuación prima para determinar las rectas de los tratamientos restantes y su respectiva comparación estadística de interceptos (H_0 : interceptos iguales), equivalentes a la K saturada.

Finalmente se realizó un análisis de correlación entre las variables hidrofobia (índice R) y conductividad hidráulica saturada (K_s), para determinar si la repelencia al agua altera el flujo de agua en el suelo. Para ello se realizó un ajuste logarítmico de la variable K en función del índice R, logrando un ajuste con una significancia al 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados agrupados como propiedades generales del suelo (resistencia a la penetración, textura, densidad aparente y materia orgánica) y propiedades relacionadas a funcionalidad del suelo (conductividad hidráulica y repelencia al agua).

Propiedades generales de los suelos

Resistencia a la penetración (RP)

El conocimiento de la distribución espacial de la resistencia a la penetración del suelo puede ser útil en la identificación de zonas compactadas, de manera de enfrentar el problema y generar los manejos que reduzcan al mínimo sus efectos negativos, como lo son la disminución de los rendimientos de los cultivos y el riesgo de erosión por incremento del escurrimiento superficial (Usowicz y Lipiec, 2009). Según lo anterior, el objetivo de identificar la variabilidad de las resistencias mecánicas del suelo, permitió determinar dos zonas: una de alta y otra de baja RP, según valores de 0–5 cm, para luego realizar las evaluaciones de las demás propiedades de suelo según cada zona por separado, de manera de tener sitios homogéneos, disminuyendo la variabilidad entre las muestras.

La Figura 4 muestra la tendencia en profundidad de la RP. Por su parte la Figura 5, presenta el mapa de distribución espacial de la RP obtenida en campo, donde se puede identificar las zonas de alta y baja RP que se utilizaron para el resto de los análisis.

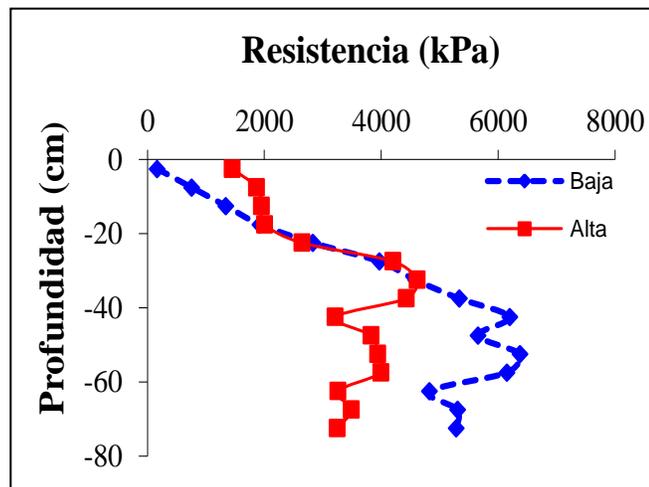


Figura 4. Promedio zonas de alta (rojo) y baja (azul) RP, definidas según criterio de resistencia de 0-5 cm.

De acuerdo a la Figura 4, la zona de alta RP es consecuencia del tránsito repetido que se realiza en el sitio, asociado a la entrada del potrero, lo que ha provocado un deterioro de la estructura y el sistema poroso del suelo (Strudley *et al.*, 2008), con una reorganización de las partículas, generando un marcado pie de arado a los 30 cm aproximadamente. En cuanto a la zona de baja RP, esta presenta menores valores en superficie, pero en profundidad va en constante aumento, incluso superando los valores de la zona de alta RP. En dicha zona se presentaría un proceso similar de reordenamiento de partículas, pero el desarrollo del pie de arado estaría a mayor profundidad (40 cm aproximadamente) y con una mayor intensidad.

El aumento constante de la RP en profundidad en el sitio de baja RP, es consecuencia de la masa sobre yacente de suelo, ya que constituye una carga normal hacia estratas subsuperficiales, generando acumulaciones de presiones a medida que aumenta la profundidad (Schäffer *et al.*, 2010). La alteración de esa tendencia puede deberse a la estratificación producto de la pedogénesis o a procesos de compactación producto de la mecanización (Horn *et al.*, 2007). Aun así, la RP no supera los 8000 kPa, considerado por Schoeneberger *et al.* (2012) como un nivel muy alto.

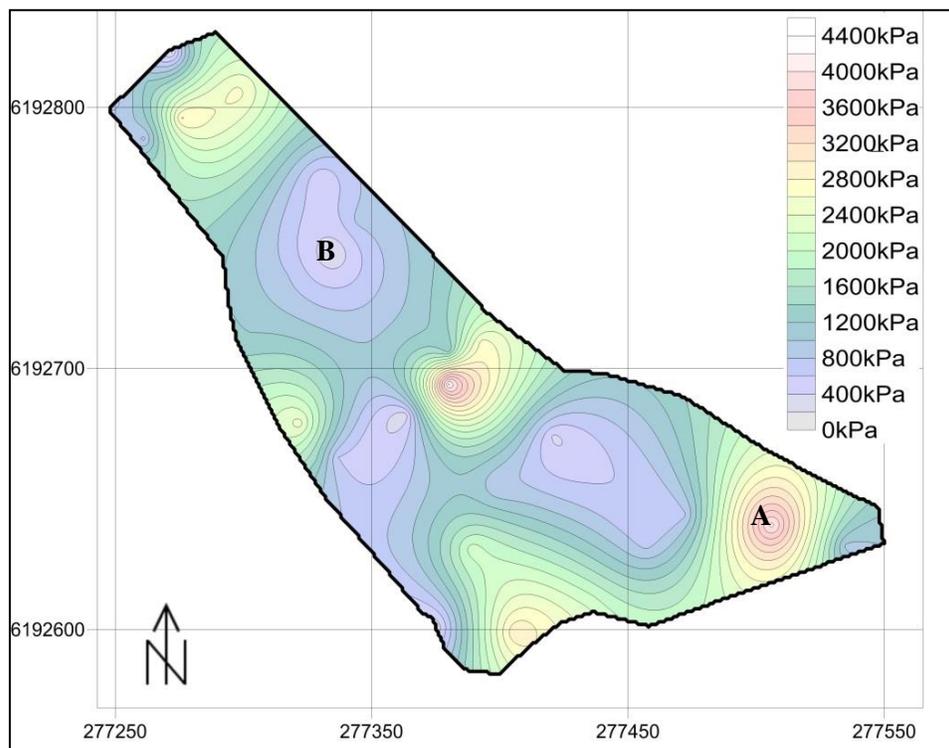


Figura 5. Distribución espacial de RP (0-5 cm) en el sitio de estudio. Se indican las zonas de alta RP (A) y baja RP (B) muestreadas en repeticiones distribuidas al azar.

Como se mencionó previamente, la zona A indicada en la Figura 5, corresponde a la entrada del predio, el cual presenta mayores valores de resistencia a la penetración, dada la mayor frecuencia de tránsito producto de los manejos de la temporada. Por otro lado, la

zona de baja RP (B), presenta menores valores relacionados con la menor exposición al tránsito y, como se verá más adelante, con la variabilidad natural de la clase textural del suelo, que podría estar interviniendo en la respuesta a los procesos de compactación (Horn, 2003).

Se sabe que el efecto que produce el número de pasadas de un tractor es acumulativo y que la RP aumenta con la intensidad del tráfico (Ellies *et al.*, 2001). Lo anterior fue evaluado por Usowicz y Lipiec (2009), quienes determinaron que el máximo efecto se presenta entre la primera y la tercera pasada del tractor a un rango de profundidad de 0 a 0,6 m, y que este efecto disminuye a mayor profundidad, por lo que las consecuencias se manifiestan predominantemente cerca de la superficie. Además, Horn y Fleige (2009) demostraron que neumáticos con una carga de 3,3 Mg ejercen una tensión normal media de aproximadamente 50 kPa a los 40 cm de profundidad y que al aumentar esta carga a 6,5 Mg se generan tensiones de más de 100 kPa, incluso a 60 cm de profundidad. Así mismo, estos autores comprobaron que los suelos francos presentan una mayor sensibilidad a las cargas externas que los suelos arenosos o arcillosos, debido a las diferencias en la distribución del tamaño de poros.

Los efectos provocados en el crecimiento de la raíz a consecuencia del incremento de la resistencia mecánica fueron estudiados por Taylor y Brar (1991), quienes determinaron una disminución lineal de la elongación radical a partir de un rango de RP de entre 200 y 500 kPa. Por otra parte, Pérez *et al.* (2010) consideran que el crecimiento de raíces es igual a cero con una resistencia a la penetración de suelo de aproximadamente 5.000 kPa y, en el caso específico del cultivo de maíz, Hadas (1997) informó valores de nulo crecimiento de la raíz, en un rango de 1.600 a 3.700 kPa. Es decir, existen las condiciones para pensar que en el sitio de baja RP el enraizamiento del maíz se verá afectado bajo los 40 cm de profundidad (Figura 4).

Textura

La textura influye en el comportamiento mecánico y la facilidad de labranza del suelo, la cantidad de agua y aire que puede retener y la velocidad con que el agua penetra y circula en él (FAO, 2009). El tamaño de las partículas está determinado por el material parental y la pedogénesis, la cual ante los procesos de erosión afecta otras propiedades, como estructura, porosidad y consistencia. El Cuadro 2 presenta los separados texturales según tratamientos para las zonas de alta y baja RP.

El análisis granulométrico del suelo permitió definir una clase textural Franco arenosa (Fa), con un porcentaje promedio de arcilla de 7,4%. Este resultado permite hacer inferencias respecto de la estructura y la estabilidad de los agregados. Es sabido que suelos donde predominan las arenas tenderán a presentar una estructura de grado débil, mientras que los suelos arcillosos presentan agregados más estables, caracterizándose por ser estructurados (Warrick, 2002). Esto se explica por las cargas electroquímicas que presentan las partículas

finas, las cuales se cohesionan con agentes cementantes, como por ejemplo la materia orgánica, manteniendo las uniones y aumentando la tensión efectiva (Horn y Lebert, 1994). Finalmente, existirá una relación directa con los flujos dentro del perfil, donde suelos bien estructurados presentarán poros continuos, favoreciendo el flujo de agua y el intercambio gaseoso, mientras que suelos con estructura débil, como las arenas, el flujo de agua se verá favorecido por el espacio presente entre partículas (Hillel, 1980). Según lo anterior, la comprensibilidad del suelo, la cual corresponde a la proporción en que una masa de suelo disminuye su volumen cuando soporta una carga, será más baja en suelos de textura gruesa (Horn y Lebert, 1994), como el descrito en el sitio de estudio.

Cuadro 2. Granulometría superficial (0- 10 cm) y bajo la zona arada (30- 40 cm) para cada zona del estudio.

Zona	Trat.	Posición	Prof. cm	Textura ^a			Clase textural (USDA)
				Arena	Limo ------(%)-----	Arcilla	
Alta RP	T1	No huella	0	57,6 ± 2,2	34,9 ± 1,9	7,5 ± 1,8	Fa ^b
	T2	No huella	30	64,7 ± 2,1	28,8 ± 17,2	6,5 ± 3,9	Fa
	T3	Huella	0	57,0 ± 5,6	35,9 ± 10,2	7,2 ± 2,2	Fa
	T4	Huella	30	64,6 ± 15,9	30,5 ± 9,2	4,9 ± 0,6	Fa
\bar{x}^c				61,0(±4,3) a	32,5(±3,4) a	6,5(±1,1) b	Fa
Baja RP	T1	No huella	0	51,8 ± 5,1	40,4 ± 2,9	7,9 ± 2,7	Fa
	T2	No huella	30	57,0 ± 7,9	35,2 ± 6,1	7,8 ± 2,1	Fa
	T3	Huella	0	50,5 ± 2,1	40,4 ± 2,8	9,2 ± 1,3	Fa
	T4	Huella	30	55,2 ± 4,9	36,4 ± 4,3	8,4 ± 0,9	Fa
\bar{x}^c				53,6(±3,0) b	38,1(± 2,7) a	8,3 (±0,6) a	Fa

^aPromedio ± Desviación estándar; dentro de una misma zona, no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos.

^bFa: Franco arenoso.

^cPromedio ± Desviación estándar. Letras distintas denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre promedios de zonas de alta y baja RP para un mismo tamaño de partícula.

Si bien no hubo diferencias estadísticas significativas entre los contenidos de arcilla, limo y arena entre los tratamientos (Cuadro 2), se observó una tendencia a incrementar el contenido de arena y a disminuir el limo en profundidad. Además, hubo diferencias significativas para arcilla y arena entre las zonas de Alta y Baja RP (Cuadro 2). La zona de Alta RP presentó un valor promedio mayor de arena y menor valor promedio de arcilla que la zona de Baja RP. Aun así, dentro de cada zona analizada existe una alta homogeneidad textural, lo que permite comparar los tratamientos como un resultado del manejo.

Densidad Aparente (Da)

Debido a los manejos de laboreo que se practican en el suelo, la Da es una propiedad que varía dentro de una misma temporada (Osunbitan *et al.*, 2005). Estas variaciones reflejan cambios en la estructura del suelo, que se relacionan estrechamente con la porosidad total, siendo esta última propiedad altamente sensible al contenido de materia orgánica (MO) y al manejo (Horn y Lebert, 1994). Esto ocurre por el hecho que cualquier carga aplicada en la superficie del suelo se transmite en tres dimensiones a través de las fases sólida, líquida y gaseosa. Si la permeabilidad al aire es lo suficientemente alta como para permitir la deformación inmediata de los poros llenos de aire, el asentamiento del suelo afectará principalmente el flujo de agua (Horn, 2003).

Es así como, en sectores bajo tránsito de maquinaria se esperan valores de Da mayores en comparación a zonas sin tránsito, resultados que no se cumplieron a cabalidad en el presente estudio (Figura 6). Además, los valores de Da en ambas zonas de muestreo no presentan gran variabilidad, por lo que no hay diferencias atribuibles a los tratamientos en las zonas de alta y baja RP. Es importante destacar que para la clase textural franco arenosa, Sandoval *et al.* (2012) señalan valores de Da en el rango de 1,4 a 1,8 Mg m⁻³, por lo que en este estudio los valores fueron bajos en relación a lo esperado. Por otra parte, hay que considerar que las arenas presentan una menor compresibilidad frente a cargas externas (Horn y Lebert, 1994), por lo que dependiendo de su forma, tamaño y mezcla pueden mantener sus valores de Da relativamente estables frente a estos eventos de carga mecánica (Blume *et al.*, 2010).

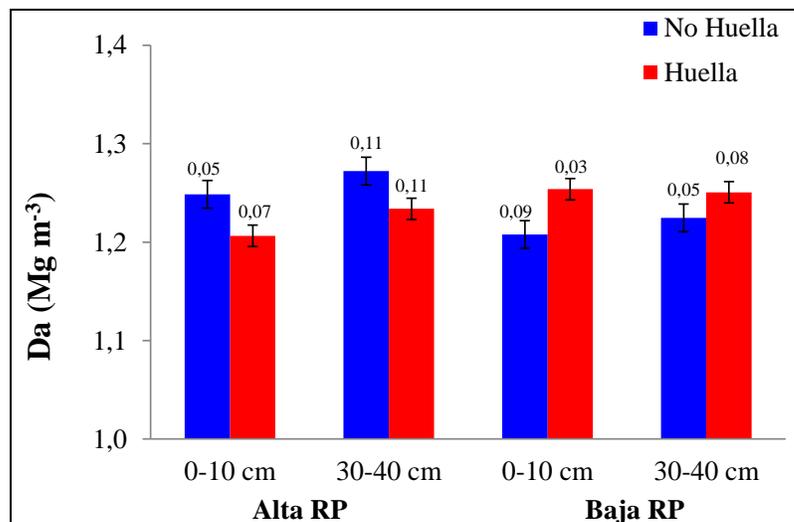


Figura 6. Densidad aparente (Da) en función de los tratamientos del estudio. Valores promedio \pm desviación estándar. No hubo diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$).

Aunque la zona de alta RP presentó menores valores de Da en la posición dentro de la huella del paso del tractor, esta tendencia no correspondería a los valores esperados debido

a la exposición a fuertes presiones ocasionadas por el paso de maquinaria en la zona bajo la huella. Esto puede estar relacionado a las labores de labranza que mullen el suelo, invirtiendo y soltando las áreas compactadas. Para el caso del sitio de alta RP, al tener un mayor contenido de arena, el primer paso de maquinaria genera su asentamiento definitivo (Horn, 2003), previniendo el posterior reacomodo de partículas; en tanto, en el sitio sin tránsito, las partículas siguen reacomodándose con los sucesivos ciclos de humectación y secado generados por los riegos (Seguel y Horn, 2006). La zona de baja RP, tal como se esperaba, presentó valores de D_a menores en el área fuera de la huella del paso de tractor en relación a su símil bajo la huella. Sin embargo, estos valores fueron medidos aproximadamente 6 meses después de las labores de labranza, por lo que probablemente fueron mayores a los que se hubiesen registrado inmediatamente después de la preparación del suelo. Al respecto, Osunbitan *et al.* (2005) reportaron incrementos constantes de D_a en distintos sistemas de labranza posterior a la preparación del suelo, alcanzando valores hasta 55% más altos transcurridas unas pocas semanas.

Finalmente, para disminuir el efecto de la presión que ejerce el uso constante de maquinaria para la labranza y otras labores, Horn y Fleige (2009) recomiendan que esta debe ser ajustada a la capacidad de soporte del suelo y que la carga de la rueda no exceda de 3,3 Mg, condición que en general se cumple en los sistemas de producción de maíz en Chile.

Contenido de Materia Orgánica del suelo (MO)

La materia orgánica del suelo se ha aplicado como un término amplio para describir todos los materiales de origen biológico en el suelo (Stolt *et al.*, 2010), siendo el carbono (C) el elemento principal en su composición. La agricultura se define como una manipulación antrópica del C a través de la absorción, fijación, emisión y transferencia de C entre los distintos depósitos (Lal, 2004), siendo su principal efecto la emisión de CO_2 a la atmósfera producto de la combustión microbiológica de la MO, junto con la estratificación de residuos orgánicos producto de los sistemas de labranza (Franzluebbers, 2002). La Figura 7 presenta los contenidos de MO de los tratamientos según zona de RP.

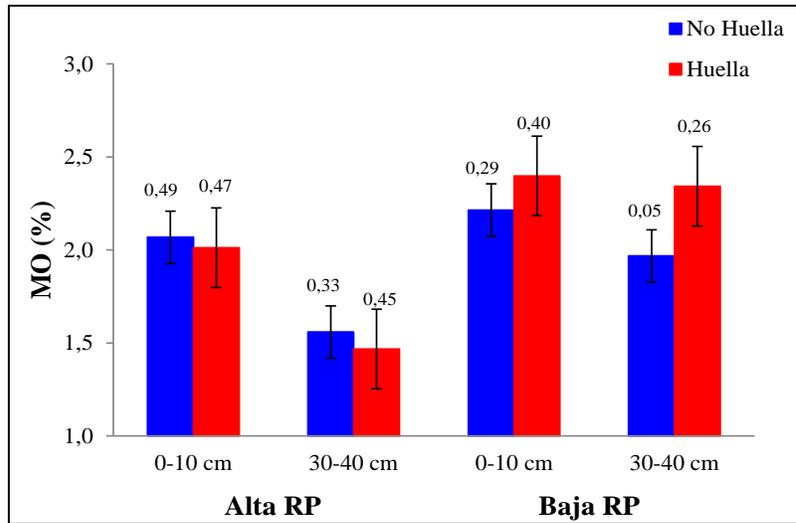


Figura 7. Contenido de materia orgánica (MO%) en función de la posición y la profundidad. Valores promedio \pm desviación estándar. Dentro de cada zona, no hubo diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$) entre los tratamientos.

En el sitio de estudio se realizan prácticas de incorporación de residuos de cosecha, labor que reemplaza la quema de rastrojos. Esta labor de incorporación de material orgánico al suelo, contribuye a disminuir los efectos de erosión y contaminación atmosférica (Lal, 2004). Sin embargo, en el presente estudio los contenidos registrados de MO no arrojaron gran variabilidad entre los tratamientos y presentaron niveles considerados como bajos ($< 2,5\%$), con pobre condición biológica y física para suelos de la zona central de Chile según Ortega y Díaz (1999). Por otro lado, al comparar entre zonas de alta y baja RP, sí se encontraron diferencias estadísticamente significativas (Figura 8).

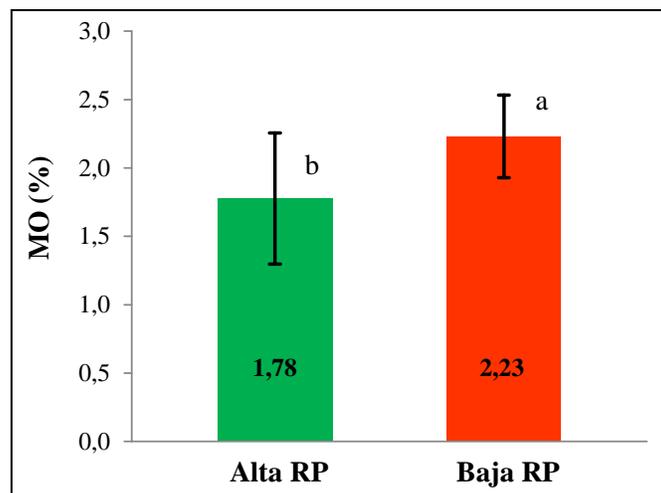


Figura 8. Contenido de materia orgánica (%), según zona de RP. Diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) entre zonas de alta y baja RP.

Los resultados presentados en la Figura 8, muestran que la zona de baja RP posee un mayor porcentaje de MO, con un 0,45% más que el sitio de alta RP, equivalentes a

aproximadamente 22 Mg ha⁻¹ de C orgánico entre 0-40 cm de profundidad. Cabe destacar que estos valores son el resultado promedio de los cuatro tratamientos de cada zona, y que los valores se encuentran dentro de los rangos esperados para Inceptisoles (Lal, 2004).

Propiedades de funcionalidad del suelo

Índice de Repelencia al agua (R)

Es sabido que la estabilidad de los agregados está influenciada principalmente por la cantidad y la calidad de la MO en el suelo (Picolo y Mbagwu, 1999), donde algunos compuestos favorecen la estabilidad al agua, ya sea por una acción cementante en los puntos de contacto o por su repelencia al agua, lo que reduce la velocidad de humectación de los agregados (Chenu *et al.*, 2000).

La excesiva hidrofobicidad del suelo, causada por la presencia de recubrimientos hidrófobos sobre partículas sólidas, se traduce en una reducción en la tasa de humectación y una repelencia del agua en el suelo (Hallet, 2007). Esta repelencia al agua se debe a la acumulación de ciertos tipos de compuestos orgánicos hidrofóbicos, los cuales no presentan un grado de alteración muy avanzado, y que tienen su origen en el metabolismo y/o descomposición de organismos, principalmente vegetales y microbiales (Doerr *et al.*, 2000; Vargas, 2014). En general la repelencia incrementa con aumentos de la materia orgánica y disminuye con aumentos en los contenidos de arcilla de los suelos (Harper *et al.*, 2000). Para el caso de la Figura 9a, la infiltración es mayor en agua que en etanol, lo que implica que el suelo se humecta rápidamente, con riesgos de dispersión por una baja estabilidad al agua (Ellies *et al.*, 2005). Por otra parte, una pequeña repelencia (Figura 9b) es necesaria para asegurar una buena estabilidad frente a eventos de mojamiento (Hallet *et al.*, 2001).

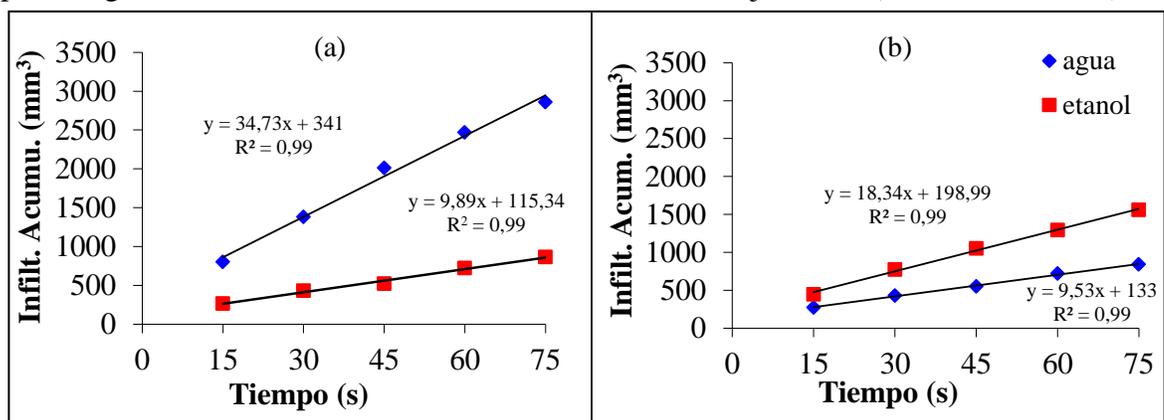


Figura 9. Infiltración acumulada (mm³) en función del tiempo (s). La figura izquierda (a) corresponde a un suelo hidrofílico y la de la derecha (b) a un suelo hidrófobo.

En el caso de una repelencia excesiva o una distribución heterogénea ésta, cambian las características hidráulicas de los suelos, provocando la aparición de flujos preferenciales. Fuentes *et al.* (2015) estudiaron el flujo preferencial de formas nitrogenadas en el suelo, en la misma localidad de este estudio, demostrando que el movimiento de este elemento está intrínsecamente relacionado con el del agua y la presencia considerable de porosidad textural (TP), la cual es abundante en suelos de textura gruesa. Al respecto, estos autores detectaron flujos preferenciales, sin atribuirlos necesariamente a fenómenos de hidrofobia, pero igualmente implicando un riesgo ambiental debido al potencial de contaminación de napas subterráneas.

Un método sencillo para la evaluación de la repelencia al agua lo constituye el índice R, en el que muestras secas al aire son sometidas a flujos de agua y posteriormente a etanol. Suelos hidrofílicos presentarán mayor infiltración acumulada de agua que suelos hidrófobos; por otro lado, suelos hidrófobos mostrarán mayor infiltración acumulada de etanol. A modo de ejemplo, la Figura 9 presenta la infiltración acumulada de agua y etanol en función del tiempo de agua y etanol de un suelo hidrofílico y otro hidrófobo, en tanto el Cuadro 3 presenta los promedios obtenidos del índice de repelencia (R) calculado con la Ecuación 3.

Cuadro 3. Índice de repelencia (R, adimensional) obtenido por el método propuesto por Tillman *et al.* (1989) en muestras secas al aire.

Zona	Trat.	Posición	Prof. (cm)	Índice R
Alta RP	T1	No huella	0	1,33 ($\pm 0,37$)
	T2	No huella	30	1,57 ($\pm 0,38$)
	T3	Huella	0	1,64 ($\pm 0,42$)
	T4	Huella	30	1,39 ($\pm 0,40$)
Baja RP	T1	No huella	0	1,70 ($\pm 0,63$)
	T2	No huella	30	1,58 ($\pm 0,69$)
	T3	Huella	0	2,02 ($\pm 0,70$)
	T4	Huella	30	1,70 ($\pm 0,26$)

Finalmente, de acuerdo a los resultados del Cuadro 3, en general los tratamientos no presentaron repelencia al agua o hidrofobia (Hallet *et al.*, 2001), salvo el tratamiento 3 de la zona de baja RP, con valor de R ligeramente mayor a 2. Aun así, no hubo diferencias significativas ($p > 0,05$) entre tratamientos ni entre las zonas de alta y baja RP. Los valores de R son considerados como bajos (Hallet, 2007), lo que unido al contenido de limo (30-40%, Cuadro 2) podría estar indicando una tendencia a la formación de costras superficiales por una dispersión de agregados al humectarse (Chenu *et al.*, 2000).

Conductividad hidráulica (K)

La conductividad hidráulica (K) del suelo es una propiedad que explica el movimiento del agua en el suelo (Hillel, 1980). Los suelos aluviales arenosos tienen una alta K a bajas tensiones (cercano a saturación), debido a su mayor cantidad de macroporos ($> 10\mu\text{m}$), proporcionado por el espacio que se produce entre las partículas gruesas; sin embargo, al desaturarse rápidamente los poros se llenan con aire, lo que determina una pérdida en la capacidad de conducir agua, reflejado en bajos valores de conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) (Warrick, 2002).

Los procesos mecánicos e hidráulicos están interrelacionados y se afectan mutuamente (Horn, 2003), por lo que, al modificar la estructura del suelo por los usos y manejos de este, debería cambiar también la conductividad hidráulica saturada y no saturada. La magnitud de estos cambios estructurales depende de: i) la oportunidad y frecuencia de las operaciones de labranza superficial y sub-superficial del suelo y, ii) el efecto compactador producido por el tránsito de la maquinaria agrícola y/o tránsito de animales (Nissen *et al.*, 2006).

Resultados de K_{ns} por modelo de Regresión Lineal. Jarvis y Messing (1995, citado por Warrick, 2002), proponen, para describir el comportamiento de la K_{ns} en función de la tensión de agua, un ajuste con dos líneas rectas; una línea describe el comportamiento cercano al tamaño mínimo de mesoporos y otra línea recta describe el comportamiento cercano a saturación, asociado a macroporos, siendo esta última mucho más pronunciada en los suelos arcillosos. Para el caso del presente estudio, dada la clase textural del suelo y las bajas tensiones de suministro de agua, se consideró el comportamiento dentro del primer tramo de naturaleza rectilínea (Figura 10), lo que permite extrapolar la K saturada (K_s) al valor de tensión cero mediante el ajuste lineal (Cuadro 4).

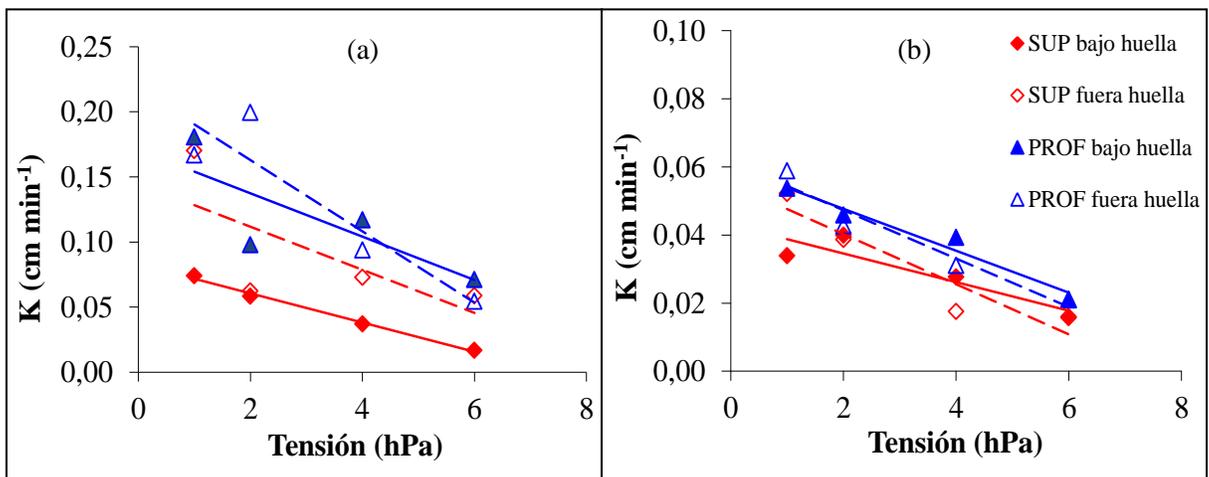


Figura 10. Conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) medida en terreno a tensiones de 1, 2, 4 y 6 hPa. La figura (a) corresponde a la zona de Alta RP y (b) a la zona de Baja RP. La leyenda aplica para ambas figuras. Nótese el cambio de escala del eje Y.

Los resultados promedio obtenidos en campo, muestran que la K_{ns} fue mayor en profundidad que en superficie, dado que en profundidad aumenta el contenido de arena (Cuadro 2). Además, al momento de tomar las mediciones se observó en superficie la formación de una capa laminar de partículas finas que sellan la entrada de agua al suelo, lo que se debe probablemente a un proceso de dispersión por baja estabilidad al agua. Sumado a lo anterior, los procesos de laboreo contribuyen a una homogeneización completa del horizonte Ap, aumentando la sorptividad del sistema poroso y cortando la continuidad con la macroporosidad subsuperficial (Dexter *et al.*, 2004).

Cuadro 4. Ecuaciones de conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) en función de la tensión de suministro (hPa) para un modelo lineal a partir de los promedios de las repeticiones. Letras distintas denotan diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) según prueba *t*.

Zona	Trat.	Posición	Prof. (cm)	K (cm min^{-1})	P- Valor	Prueba <i>t</i>	
Alta	T1	No huella	0	T1= $-0,017x + 0,145$	0,1459	ab	
	RP	T2	No huella	30	T2= $-0,027x + 0,218$	0,0065	a
		T3	Huella	0	T3= $-0,011x + 0,083$	0,0003	b
		T4	Huella	30	T4= $-0,017x + 0,171$	0,1693	ab
Baja	T1	No huella	0	T1= $-0,007x + 0,055$	0,0409	ab	
	RP	T2	No huella	30	T2= $-0,007x + 0,062$	0,0007	a
		T3	Huella	0	T3= $-0,004x + 0,043$	0,1329	b
		T4	Huella	30	T4= $-0,006x + 0,060$	0,0323	ab

Las ecuaciones de los ajustes de la Figura 10 se presentan en el Cuadro 5, con rectas lineales de pendiente negativa que indican que la K_{ns} disminuye al aumentar la tensión del agua; sin embargo, no todos los casos se ajustan bien al modelo rectilíneo, perdiendo significancia estadística.

Es posible apreciar que en la zona de alta RP, tanto la pendiente como el intercepto son mayores en el sector fuera de la huella que bajo ésta a una misma profundidad, lo que tiende a homogenizarse en el sitio de baja RP. La prueba *t* arrojó que en ambas zonas (alta y baja RP) la conductividad hidráulica saturada (intercepto de la ecuación) mantiene mayores valores bajo la zona arada (30 cm) y los valores más bajos en el tratamiento de superficie bajo la huella del tractor. Esto refleja que la última condición estaría mayormente afectada por los procesos de compactación dados por la labranza y posterior tránsito de maquinaria.

Resultados de K_{ns} por modelo lineal general mixto (MLGM). Como se mencionó en la descripción del análisis estadístico, las ecuaciones presentadas por el MLGM fueron obtenidas por el ajuste con todos los datos (Figura 11), tomando como referencia el T1 para construir las ecuaciones de ajuste (Cuadro 5).

Como se observa en la Figura 11, el sitio de estudio presenta valores típicos de K_{ns} para clases texturales donde predominan arenas finas y limo (Coduto, 1999). Además cabe destacar que en general los tratamientos situados en profundidad en ambas zonas (alta y baja RP) muestran mayores valores de K_{ns} que en los tratamientos en superficie. Esto podría estar explicado por el hecho que las partículas de suelos de la zona disturbada por la labranza se reacomodan con el tiempo, perturbando el flujo continuo de agua en el perfil (Bhattacharyya *et al.*, 2006).

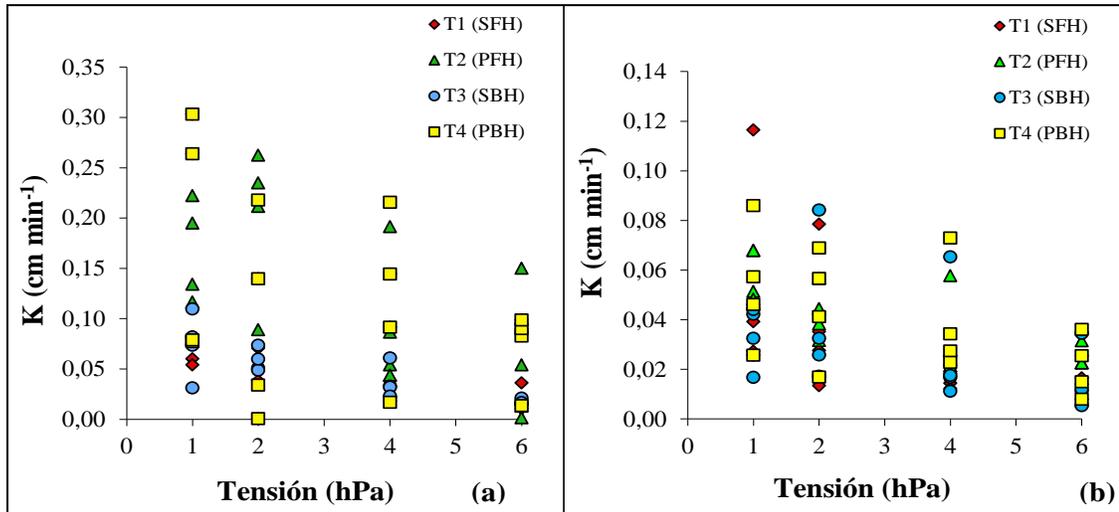


Figura 11. Conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) en función de la tensión de suministro de agua para mediciones en superficie (S) y a 30 cm de profundidad (P) fuera (FH) y bajo (BH) la huella del paso del tractor. Se presentan las cuatro repeticiones de cada tratamiento. Zonas de alta RP (a) y baja RP (b). Nótese el cambio de escala del eje Y.

Como se observa en el Cuadro 5, aparentemente los ajustes con el MLGM no presentan diferencias con el modelo de regresión lineal (Cuadro 4); sin embargo, la alta variabilidad de las repeticiones en el MLGM genera una alta dispersión de los datos, lo que se traduce en que ninguna recta es significativamente diferente a otra. Más aún, en la mayoría de los casos el resultado estadístico indica que la pendiente no es distinta de cero (Apéndice I), lo que significa que la variable K_{ns} es independiente de las tensiones a las que se expone en la medición de campo. Cabe destacar que los valores de P mostrados en el Cuadro 5 indican la significancia de las rectas de forma independiente, en tanto en el Apéndice I aparece la comparación con la ecuación prima. En definitiva, para efectos de validación estadística, el mejor método para analizar la K_{ns} es a través del ajuste lineal de los promedios de las repeticiones en cada tensión, siendo necesario aumentar la intensidad de muestreo en casos que se requiera mejorar la significancia del ajuste.

Si bien los modelos aplicados para describir el comportamiento de K_{ns} no presentaron valores con diferencias estadísticamente significativas, la obtención de las rectas lineales permite determinar la conductividad saturada (K_s) de los tratamientos del sitio de estudio, a través del intercepto con el eje Y.

Cuadro 5. Ecuaciones de conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) en función de la profundidad en alta y baja RP según posición bajo y fuera de la huella del paso de tractor.

Zona	Trat.	Posición	Prof. (cm)	K_{ns} (cm min^{-1})	P- Valor
Alta RP	T1	No huella	0	$T1 = -0,017x + 0,144$	<0,0001
	T2	No huella	30	$T2 = -0,027x + 0,218$	<0,0001
	T3	Huella	0	$T3 = -0,011x + 0,083$	0,0127
	T4	Huella	30	$T4 = -0,017x + 0,171$	0,1693
Baja RP	T1	No huella	0	$T1 = -0,007x + 0,055$	<0,0001
	T2	No huella	30	$T2 = -0,007x + 0,061$	<0,0001
	T3	Huella	0	$T3 = -0,004x + 0,043$	0,0002
	T4	Huella	30	$T4 = -0,062x + 0,060$	0,0321

Conductividad hidráulica saturada (K_s)

Como era de esperar (Cuadro 6), la K_s presentó valores que aumentaron en profundidad, dado el incremento tanto en el contenido como en el tamaño de las arenas. La K_s no presentó diferencias bajo o fuera de la zona de tránsito ni entre zonas de alta y baja RP, lo que resultaría de un estado estructural deteriorado por exceso de labranza en forma homogénea en términos espaciales. Esta homogeneización entre ambas zonas y tratamientos, podría deberse a las labores de aradura que se realizan estacionalmente. Lo anterior se valida según lo propuesto por Bhattacharyya *et al.* (2006), quienes concluyeron que los sistemas de labranza convencional provocan una ruptura de las áreas compactadas generando un aumento de la porosidad total del suelo, pero una disminución de la cantidad de macroporos, además de su estabilidad y continuidad en comparación a los sistemas de cero labranza. Los anterior podría explicar que los resultados obtenidos para ambas zonas de alta y baja RP, en general, clasifican como suelos con una K_s alta, dado que están dentro del rango 0,06 a 0,6 cm min^{-1} , y en cuanto a su permeabilidad el sitio de estudio califica como moderadamente rápido, según Schoeneberger *et al.* (2012). Estos resultados son coincidentes con estudios previos que se han realizado en el mismo sitio, donde se ha determinado que los suelos muestran una moderada a muy rápida K a saturación (Fuentes *et al.*, 2015).

Cuadro 6. Conductividad hidráulica saturada (promedio, límite superior y límite inferior con $p \geq 0,95$) en función de la profundidad en zonas de alta y baja RP y para muestras bajo la huella y fuera de la huella del tractor.

Conductividad hidráulica saturada (cm min^{-1})			
Posición	Profundidad (cm)	Alta RP (LS;LI)	Baja RP (LS;LI)
Huella	0	0,083 (-0,021; 0,191)	0,043 (-0,028; 0,116)
	30	0,171 (0,069; 0,281)	0,060 (0,031; 0,092)
No Huella	0	0,144 (0,073; 0,224)	0,055 (0,005; 0,107)
	30	0,218 (0,117; 0,329)	0,061 (-0,009; 0,135)

Como se observa en el Cuadro 6, los intervalos de confianza presentan gran dispersión. Consecuencia de ello, los interceptos de las ecuaciones de ajuste (Cuadro 5) no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, es decir, la K_s se comporta de forma independiente a las posiciones y profundidades a la que fue medida. La dispersión obtenida de esta propiedad no escapa de la variabilidad natural, en espacio y tiempo, característica acrecentada en los sistemas de labranza convencional, que incluyen la aradura, donde la K aumenta en los eventos de labranza y luego disminuye durante la estación de crecimiento debido al asentamiento de la estructura del suelo (Angulo Jaramillo *et al.*, 1997, Azevedo *et al.*, 1998, Bormann y Klaassen, 2008; Alletto y Coquet, 2009). En este sentido, Strudley *et al.* (2008) recomiendan realizar campañas temporales/anuales de medición para aclarar comportamientos a corto plazo, dado que son múltiples los factores que influyen y determinan el comportamiento de la conductividad hidráulica del suelo (labranza, compactación del suelo, riego, gestión de residuos, tipo de cultivo, clima, textura del suelo y contenido de materia orgánica, topografía, actividad biótica, etc.).

Correlación conductividad hidráulica (K) e hidrofobia (R)

Se evaluó la dependencia de la variable K con respecto a la variable independiente R (Figura 12). Es sabido que el contenido de C en los suelos se correlaciona positivamente con la conductividad hidráulica, esto debido a que mejora la estructura del suelo (Phatak *et al.*, 2012). Aun así, la presencia de sustancias hidrófobas en los suelos puede disminuir considerablemente los procesos de infiltración en éstos y, dependiendo de la magnitud de dicha repelencia, pueden generarse procesos de escorrentía superficial e incluso verse afectado el crecimiento de las plantas al producirse flujos irregulares de humedecimiento (Orellana *et al.*, 2004; Bodí *et al.*, 2012, Seguel *et al.*, 2013).

Si bien los contenidos de MO del sitio de estudio no son altos (Figura 8), su presencia podría estar interviniendo con la repelencia al agua, ya que ésta es un fenómeno que tiene relación con la superficie específica que ocupa el recubrimiento de las partículas, por lo que clases texturales gruesas se verán más afectadas por la hidrofobia que clases texturales finas (Harper *et al.*, 2000).

Los suelos en los cuales dominan las arenas, como el caso del presente estudio, tienen una superficie de contacto más baja que los arcillosos, por lo tanto, la generación de una superficie hidrófoba tendrá impacto en una mayor proporción de partículas que para un suelo de textura fina, en donde la superficie de contacto es hasta tres veces mayor (Hallet, 2007). La correlación entre ambas propiedades se determinó utilizando los valores promedio de las repeticiones de cada uno de los tratamientos de ambas zonas (alta y baja RP). Como se observa en la Figura 12, existe una dependencia lineal inversa entre estas variables (a menor repelencia mayor K). Además, se observa que la zona de baja RP presenta los mayores valores de repelencia al agua, condición que explicaría los menores valores de K respecto al sitio de alta RP.

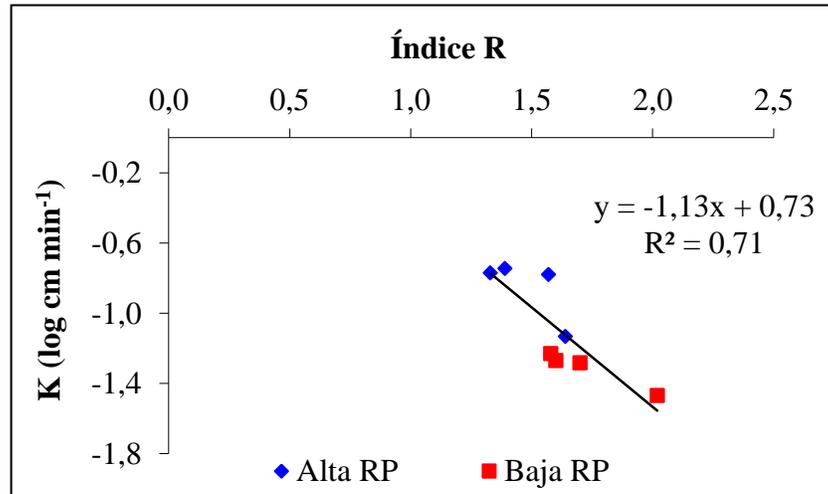


Figura 12. Conductividad hidráulica (Log K) en función del índice de repelencia (R). Ajuste significativo al 99%.

Es posible que el método de laboratorio utilizado para determinar la presencia de hidrofobia no haya sido lo suficientemente sensible, por lo que inicialmente el índice R no explicó los problemas asociados a la entrada de agua en el perfil. Sin embargo, aun cuando el índice R detectó una condición hidrofílica del suelo de estudio, pequeñas variaciones poseen un efecto directo sobre la K_s , indicando que existirían procesos de dispersión de partículas por efecto de una alta humectabilidad, sin embargo, en el sitio de alta RP estaría primando el efecto del mayor contenido de arena en relación al sitio de baja RP. En consecuencia, estudios futuros deben dilucidar la pertinencia del valor crítico de R (>2) en suelos de clase textural gruesa.

CONCLUSIONES

Para un suelo de clase textural franco arenosa sometido a labranza convencional intensiva, la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas (K) presenta un comportamiento regularmente homogéneo en los diferentes tratamientos, es decir, no se distinguen diferencias asociadas a la posición de la huella del tractor ni en profundidad, ni tampoco al efecto del estado de compactación que presenta el sitio. Este resultado se explicaría por la alteración uniforme de las estructuras generadas por las labores de labranza.

Según este análisis, las labores de labranza tradicional afectan la estructura del suelo, alterando el sistema poroso y reduciendo la capacidad de conducir agua en relación al suelo subsuperficial. De esta manera, el suelo estudiado, a pesar de incrementar su resistencia mecánica en profundidad, mantuvo la capacidad de conducir fluidos, dada la persistencia de poros gruesos entre las partículas de arena y la continuidad de estos.

Los resultados obtenidos en laboratorio con respecto a la repelencia al agua, indicaron que no existe hidrofobia en el sitio de estudio, pero este resultado contrasta con la correlación observada entre conductividad hidráulica y el índice R. Esto puede deberse a que el método utilizado no fue lo suficientemente sensible para determinar algún grado de hidrofobicidad del suelo, que podría explicar la presencia de escorrentía superficial y los problemas de infiltración de agua en el perfil identificados por los agricultores.

BIBLIOGRAFÍA

- Agostini M., G. Studdert, S. Martino, J. Costa, R. Balbuena., J. Ressia, G. Mendivil, and L. Lazaro. 2012. Crop residue grazing and tillage systems effects on soil physical properties and corn (*Zea mays L.*) performance. *Journal of Soil and Plant Nutrition* 12 (2): 271-282.
- Álvarez R. and H. Steinbach. 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 & Tillage Research* 104 (1): 1–15.
- Alleto L. and Y. Coquet. 2009. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. *Geoderma* 152: 85-94.
- Angulo-Jaramillo R., F. Moreno, B.E. Clothier, J.L. Thony, G. Vachaud, E. Fernandez-Boy and J.A. Cayuela. 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61 (1): 27–32.
- Azevedo A., R. Kanwar and R. Horton. 1998. Effect of cultivation on hydraulic properties of an Iowa soil using tension infiltrometers. *Soil Science* 163 (1): 22–29.
- Badiella L. 2011. Modelos lineales generalizados mixtos: algunos casos prácticos. X Congreso Galego de Estatística e Investigación de Operacións. Universidad Autónoma de Barcelona. 1-6 p.
- Bhattacharyya R., V. Prakash, S. Kundu and S. Gupta. 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil & Tillage Research* 86: 129–140.
- Blume H., G. Brümmer, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretschmar, K. Stahr and B. Wilke. 2010. Scheffer/Schachtschabel: Lehrbuch der Bodenkunde. 16th edn. Spektrum, Heidelberg, Deutschland.
- Bodí M., S. Doerr, A. Cerda, J. Mataix-Solera. 2012. Hydrological effects of a layer of vegetation ash on underlying wettable and water repellent soil. *Geoderma* 191: 14-23.
- Bormann H. and K. Klaassen. 2008. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two northern German soils. *Geoderma* 145: 295–302.
- Carsel, R. F. and R. S. Parrish. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resource Research* 24: 755-769.

- Chenu, C., Y. Le Bissonnais and D. Arrovays. 2000. Organic matter influence on clay wettability and soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 64: 1479-1486.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1996. Estudio Agrológico VI Región. Descripción de suelos materiales y símbolos. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación N° 114. Santiago, Chile. 570 p.
- Coduto, D. (1999). *Geotechnical Engineering Principles and Practices*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 147 p.
- Cuevas, J. 2006. Efecto de la materia organica y el manejo sobre la hidrofobicidad de suelos volcánicos. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 6 (2):13-27.
- Dexter, A.R.; E.A. Czyż and O.P. Gate. 2004. Soil structure and the saturate hydraulic conductivity of subsoils. *Soil and Tillage Research* 79: 185-189.
- Di Rienzo J., C. Robledo, M. Balzarini, F. Casanoves, L. González and M. Tablada. 2005. InfoStat Software Estadístico, Universidad Nacional de Córdoba. Recuperado en: <http://www.infostat.com.ar>. Citado: 20 de junio de 2015.
- Doerr S., R. Shakesby and R. Walsh. 2000. Soil water repellency: its causes, characteristics and hydro-geomorphological significance. *Earth-Science Reviews* 51: 33–65.
- Ellies A., C. Ramírez and R. Mac Donald R. 2005. Organic matter and wetting capacity distribution in aggregates of Chilean soils. *Catena* 59: 69-78.
- Ellies A., P. Santibañez and R. Daroch. 2001. Effect of different wheels on strength distribution in a soil profile. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 1 (2): 17-25.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) 2009. Guía para la descripción de suelos. 42p.
- Franzluebbers A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research* 66: 95–106.
- Fuentes I., M. Casanova, O. Seguel, F. Nájera and O. Salazar. 2015. Morphophysical pedotransfer functions for groundwater pollution by nitrate leaching in Central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 74 (3): 340-348.
- Hadas A. 1997. Soil tilth-the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes *Soil & Tillage Research* 43: 7-40.

- Hallet P. 2007. An introduction to soil water repellency. International Society for Agrochemical Adjuvants (ISAA). 8th International Symposium on Adjuvants for Agrochemicals (ISAA2007). Scottish Crop Research Institute.
- Hallett P., T. Baumgartl, and I. Young. 2001. Subcritical water repellency of aggregates from a range of soil management practices. *Journal of Soil Science* 65: 184–190.
- Hallet P. and I. Young. 1999. Changes to water repellence of soil aggregates caused by substrate induced microbial activity. *European Journal of Soil Science* 50: 35- 40.
- Hamza M. and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research* 82 (2): 121–145.
- Harper R., I. Mckissock, R. Gilkes, D. Carter and P. Blackwell. 2000. A multivariate framework for interpreting the effects of soil properties, soil mangement and land use on water repellency. *Journal of Hydrology* 231-232: 371-383.
- Hillel D. 1980. Fundamental of soil physics. Academic Press: 413 p.
- Horn R. 1994. The effect of aggregation of soils on water, gas and heat transport. In: E.D. Schulze: Flux Control in Biological Systems. Academic Press. 220 p.
- Horn R. 2003. Stress-strain effects in structured unsaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma* 116: 77-88.
- Horn R. and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research* 102 (2): 201-208.
- Horn R. and M. Lebert. 1994. Soil compactability and compressibility. In: B. D. Soane and C. van Ouwerkerk (eds.). Soil compaction in crop production. Amsterdam, The Netherlands: 45-69.
- Horn R., J. Vossbrink, S. Peth and S. Becker. 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*. 248 (1-2): 56-63.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2009. [On-line] Resultados VII Censo Nacional Agropecuario y Forestal. Instituto Nacional de Estadísticas. Disponible en: <http://www.censoagropecuario.cl/noticias/09/07042009.html>. Citado: 23 de septiembre de 2013.
- INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2012. [On-line] Compendio Estadístico síntesis geográfica regional. Disponible en: http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/compendio_estadistico/pdf/2012/3_sint_regional.pdf. Citado: 25 de septiembre de 2013.

- Jury W. and R. Horton. 2004. *Soil Physics*, 6th ed., John Wiley, Hoboken, N. J. 370 p.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. *Geoderma* 123(1-2): 1-22.
- Leeds–Harrison, P., E. Youngs and B. Uddin. 1994. A device for determining the sorptivity of soil aggregates. *European Journal of Soil Science* 45: 269- 272.
- Mangeaud A. y M. Videla. 2005. En busca de la independencia perdida: la utilización de Modelos Lineales Generalizados Mixtos en pruebas de preferencia. Asociación Argentina de Ecología. *Ecología Austral* 15: 199-206.
- Nissen J., C. Quiroz, O. Seguel, R. Mac Donald and A. Ellies. 2006. Flujo Hídrico no Saturado en Andisoles. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 6 (1): 9-19.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias) 2013. Maíz: producción, precios y comercio exterior. Avance a julio de 2013. Disponible en: <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/serviciosinformacion/Boletines/BMaiz0713.pdf;jsessionid=0953D27D8C95FA24FE79A17340FDEE93>. Citado: 23 de septiembre de 2013.
- Orellana, I., A. Ellies y O. Seguel. 2004. Variación de la capacidad de humectación de suelos en relación al contenido de materia orgánica. Boletín Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo 20: 399-406.
- Ortega R. y K. Díaz 1999. Análisis de fertilidad de suelos y recomendación de fertilizantes. Capítulo 6 en Agricultura de Precisión. Introducción al Manejo sitio-específico. Ministerio de Agricultura. INIA. Serie Quilamapu, Chillán-Chile. 129: 135-146.
- Osunbitan J.A., D.J. Oyedele and K.O. Adekalu. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil & Tillage Research* 82: 57–64.
- Pathak P., S. Wani and R. Rao Sudi. 2012. Long-term effects of management systems on crop yield and soil physical properties of semi-arid tropics of Vertisols. *Agricultural Sciences* 2 (4): 435-442.
- Pérez L., H. Millán and M. González-Posada. 2010. Spatial complexity of soil plow layer penetrometer resistance as influenced by sugarcane harvesting: A prefractal approach. *Soil & Tillage Research* 110: 77–86.
- Piccolo A. and J. Mbagwu. 1999. Role of hydrophobic components of soil organic matter in soil aggregate stability. *Soil Science Society of America Journal* 63: 1801–1810.
- Pioneer. 2012. Ensayos a potrero para Grano: Temporada 2011 – 2012 [En Línea]. Disponible en:

http://www.pioneer.com/CMRoot/International/Chile/Products_and_Services/ens_grano_2012.pdf > Citado: 22 de octubre de 2013.

Sadzawka, A., M. Carrasco, R. Grez y M. Mora. 2004. Métodos de análisis recomendados para los suelos chilenos. Comisión de Normalización y Acreditación, Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. 113 p.

Sandoval M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de Análisis Físicos de Suelos. Departamento de Suelos y Recursos Naturales Universidad de Concepción. Publicación N° 5. 80 p.

Salazar O., C. Rojas y C. Soto. 2013. Diagnóstico sectorial y propuesta de producción limpia: productores de maíz de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Cooperativa Campesina Intercomunal de Peumo (COOPEUMO).

Schäffer, B.; P. Boivinand and R. Schulin. 2010. Compressibility of repacked soil as affected by wetting and drying between uniaxial compression tests. *Soil Science Society of America Journal* 74(5): 1483-1492.

Schoeneberger, P.J., D. Wysocki and E. Benham. 2012. Field book for describing and sampling soils. Version 3.0 Natural Resources Conservation Service. National Soil Survey Center, Lincoln, NE.

Seguel O., S. Sagardía and M. Casanova. 2013. Effect of exudates of *Chaitophorus leucomelas* on soil hydraulic properties. *Agro Sur* 41 (2): 1-7.

Seguel O. and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting–drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 169 (2): 221–232.

Strudley M., T. Verd. and J. Ascough. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research* 99 (1): 4–48.

Stolt, M.H., P.J. Drohan, and M.J. Richardson. 2010. Insights and approaches for mapping soil organic carbon as a dynamic soil property. *Soil Science Society of America Journal*. 74:1685–1689.

Taylor H. and G. Brar. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil & Tillage Research* 19: 111-119.

Tillman R., D. Scotter, M. Wallis and B. Clothier. 1989. Water repellency and its measurement by using intrinsic sorptivity. *Australian Journal of Soil Research* 27(4): 637 – 644.

Urbanek E., P. Hallett, D. Feeney, and R. Horn. 2007. Water repellency and distribution of hydrophilic and hydrophobic compounds in soil aggregates from different tillage systems. *Geoderma* 140 (1–2): 147–155.

Usowicz B. and J. Lipiec. 2009. Spatial distribution of soil penetration resistance as affected by soil compaction: The fractal approach. *Ecological Complexity* 6: 263–271.

Uribe, J.M., R. Cabrera, A. de la Fuente y M. Peneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Laboratorio de Bioenergía y Biotecnología Ambiental. Santiago, Chile. 229p.

van Genuchten, 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892–898.

Vargas, D. 2014. Evaluación de uso del minidisco infiltrómetro para la determinación *in situ* de la hidrofobia de suelos. Memoria Ingeniero Agrónomo, Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 65p.

Warrick, A. (Ed.). 2002. Soil physics companion. CRC Press. Boca Raton. USA. 109 p.

Zhang, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1024-1030.

ANEXOS

Anexo I. Descripción morfológica de los suelos del estudio

Sitio: San Luis

Ubicación: Comuna de Pichidegua, Región de O'Higgins (34°22' S, 71°25' O, altitud 124 m)

Serie de Suelos: Terrazas aluviales no diferenciadas (CIREN, 1996)

Clasificación taxonómica (Soil Taxonomy): Typic Haploxerepts (Inceptisol)

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A _p	0-15	Pardo muy oscuro (7.5 YR 2.5/2); areno francosa; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable; poros tubulares finos; raíces finas abundantes, medianas escasas; bioporos finos abundantes; límite lineal difuso.
A ₂	15-39	Pardo oscuro (7.5 YR 3/2); areno francosa; plástico; ligeramente adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable, poros gruesos comunes; raíces finas abundantes; bioporos finos abundantes; límite lineal difuso.
B _{w1}	39-73	Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); arenosa; no plástico; no adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable; poros gruesos abundantes; raíces finas escasas; límite lineal claro.
B _{w2}	73-103	Pardo oscuro (7.5 YR 3/2); franco arcillo arenosa; muy plástico; adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable, raíces finas comunes, bioporos gruesos comunes y finos muy abundantes; límite lineal difuso.
C	103-132	Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); arenosa; no plástico, ligeramente adhesivo; bloques subangulares débiles; friable; poros gruesos abundantes; raíces finas y gruesas escasas, límite lineal difuso.
C _g	132-155+	Pardo oscuro (10 YR 3/3); arenosa; plástico; ligeramente adhesivo; bloques subangulares medios débiles, friable, raíces finas escasas; poros gruesos abundantes; presencia de rasgos redoximórficos.

Anexo II. Propiedades físicas y químicas de suelos en San Luis

Profundidad cm	Propiedades ¹								
	Db	Clase textural ²	HA	MOS	N _T	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	CE	CIC
	Mg m ⁻³	-	----- % -----			-	-	dS m ⁻¹	cmol(+) kg ⁻¹
0-15	1,35	F	11,91	1,47	0,039	6,93	6,20	1,59	9,65
15-39	1,36	Fa	9,11	1,24	0,015	6,90	5,78	1,04	10,64
39-73	1,32	Fa	6,27	1,18	0,015	6,90	5,76	0,89	10,15
73-103	1,31	F	28,18	1,35	0,024	6,80	6,80	1,32	10,94
103-132	1,46	a	0,19	0,44	0,002	7,27	4,68	0,80	10,49
132-155+	1,31	aF	5,10	0,71	0,023	7,29	5,75	0,59	10,94

¹Db: densidad aparente; HA humedad aprovechable, MOS: materia orgánica; NT: nitrógeno total; CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónica.

²F: franca; franco arenosa; aF: areno francosa; a: arenosa

APÉNDICE

Apéndice I. Salida MLGM para las zonas de alta y baja RP

Zona de Alta RP							
Efecto fijo	Valor	E.E	T-valor	P-valor			
T1 (Intercepto)	0,1448	0,0341	4,2534	0,0001			
T2	0,0729	0,0482	1,5139	0,1357	<0,0001		
T3	-0,0618	0,0482	-1,2835	0,2046	0,0043	0,0127	
T4	0,0259	0,0482	0,5381	0,5926	0,2988	0,0566	0,1693
T1. Pendiente	-0,0165	0,009	-1,8343	0,0719			
T2:T.hPa	-0,0109	0,0128	-0,851	0,3984	0,0021		
T3:T.hPa	0,0054	0,0128	0,4205	0,6757	0,1777	0,1868	
T4:T.hPa	-0,0001	0,0128	-0,004	0,9968	0,3664	0,6467	0,1693
Zona de Baja RP							
Efecto fijo	Valor	E.E	T-valor	P-valor			
T1 (Intercepto)	0,0547	0,0098	5,5942	<0,0001			
T2	0,0067	0,0138	0,4812	0,6322	<0,0001		
T3	-0,0116	0,0138	-0,8367	0,4063	0,1513	0,0002	
T4	0,0053	0,0138	0,3859	0,7011	0,9153	0,2370	0,0321
T1. Pendiente	-0,0073	0,0026	-2,8144	0,0067			
T2:T.hPa	0,0002	0,0037	0,0659	0,9477	0,0043		
T3:T.hPa	0,0031	0,0037	0,8354	0,4071	0,3983	0,1174	
T4:T.hPa	0,0011	0,0037	0,313	0,7555	0,7875	0,6078	0,0321

El Anexo III, entrega valores de ajuste para la construcción de las ecuaciones lineales que indican el comportamiento de la K para los tratamientos. T1 ($p < 0,005$) indica intercepto distinto de 0 y pendiente distinta de cero; además, esta ecuación prima se utilizó para estimar el valor delta de las rectas de los tratamientos T2, T3 y T4 ($p > 0,005$). Cabe destacar que, en general, las pendientes observadas e interceptos no presentaron diferencias estadísticamente significativas. El valor P en negrita corresponde a la significancia del ajuste (intercepto y pendiente) en tanto los otros valores de P representan la significancia al comparar cada tratamiento con la ecuación prima.