

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN UN SUELO CULTIVADO CON UNA
ROTACIÓN TRIGO-RAPS BAJO DOS SISTEMAS DE LABRANZA**

DIEGO ARIEL DÍAZ APARICIO

Santiago, Chile
2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN UN SUELO CULTIVADO CON UNA
ROTACIÓN TRIGO-RAPS BAJO DOS SISTEMAS DE LABRANZA**

**HYDRAULIC CONDUCTIVITY IN A SOIL CULTIVATED WITH A WHEAT-
RAPESEED ROTATION UNDER TWO TILLAGE SYSTEMS**

DIEGO ARIEL DÍAZ APARICIO

Santiago, Chile
2017

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN UN SUELO CULTIVADO CON UNA
ROTACIÓN TRIGO-RAPS BAJO DOS SISTEMAS DE LABRANZA**

DIEGO ARIEL DÍAZ APARICIO

Memoria para optar al Título Profesional de:
Ingeniero Agrónomo

| | Calificaciones |
|--|-----------------------|
| Profesores Guías | |
| Oscar Seguel S. Ingeniero Agrónomo, Dr. | 7,0 |
| Edmundo Acevedo H. Ingeniero Agrónomo, Ph. D. | 7,0 |
| Profesores Evaluadores | |
| Ian Homer B. Ingeniero Agrónomo, Dr. | 6,5 |
| Carla Jara C. Ingeniero Agrónomo – Enólogo, Dr. | 6,4 |
| Colaborador | |
| Paola Silva C. Ingeniero Agrónomo, Dr. | |

Santiago, Chile
2017

AGRADECIMIENTOS

La vida posee diversos aspectos donde el mundo se involucra. Incluso en los proyectos más personales siempre hay alguien que ofrece una ayuda para seguir adelante y por esto uno nunca realmente camina solo.

Por esto agradezco primero a mi familia por el apoyo incondicional en la duración de la carrera. Mis padres, que aun cuando me iba mal, me apoyaban dándome esperanzas y finalmente cambiar ese estado para terminar de buena manera los semestres, y ahora, este proyecto. Mis hermanos, quienes cuando empecé esta memoria los dos aún estaban en el colegio y ahora uno está en la universidad, ambos estaban felices por mis logros mientras estudiaba. Espero sepan que tendrán este mismo apoyo de mí.

No puedo dejar fuera tampoco a mis profesores guía, Oscar Seguel y Edmundo Acevedo quienes fueron un gran apoyo para entender las condiciones del lugar, y diversos aportes en conocimientos para la elaboración de este escrito. Sin ellos posiblemente este trabajo hubiese sido completamente diferente.

Agradezco al laboratorio SAP por el espacio otorgado para los experimentos y a sus integrantes siempre dispuestos a responder alguna pregunta. De igual manera agradezco al laboratorio de física de suelos por los implementos para realizar las mediciones.

Finalmente, a mis compañeros y amigos en la Universidad. Ángela Faúndez quien trabajaba en un proyecto similar cerca me ayudó con varios de los datos del terreno. A esos amigos que conocí en medio de la carrera y nos juntábamos, a veces para conversar, otras para jugar a la pelota, sepan que me ayudaron bastante luego de ver como todas las personas que conocí al inicio desaparecían de la carrera.

A todos ustedes, gracias.

ÍNDICE

| | |
|---------------------------------------|----|
| RESUMEN | 1 |
| ABSTRACT | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| Hipótesis | 5 |
| Objetivos..... | 5 |
| MATERIALES Y MÉTODO | 6 |
| Lugar de estudio | 6 |
| Método..... | 6 |
| Propiedades de suelo..... | 8 |
| Análisis estadístico | 11 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 12 |
| Propiedades físicas en el tiempo..... | 12 |
| Conductividad Hidráulica..... | 16 |
| CONCLUSIONES | 27 |
| BIBLIOGRAFÍA | 28 |
| Anexo 1..... | 34 |
| Apéndice 1 | 35 |

RESUMEN

Con el fin de evaluar el efecto del paso del tractor en la capacidad hidráulica del suelo, se realizaron mediciones de densidad aparente, contenido de agua y conductividad hidráulica saturada (Ks) en un suelo Franco de la Región Metropolitana, Chile. El suelo está manejado en dos sistemas de labranza, cero (NT) y convencional (CT), donde se efectúa una rotación trigo-raps. Durante el período de cultivo de trigo, se realizaron evaluaciones de suelo en los primeros 5 cm del perfil (n=4) en seis momentos relevantes (antes de labranza, después de labranza, después de siembra, primer nudo, espigadura y después de la cosecha) y en dos ubicaciones (bajo y fuera de la huella de tránsito del tractor, IT y OT respectivamente). La densidad aparente se mantuvo estable durante el período, entre 1,17 y 1,34 Mg m⁻³, encontrándose dentro de los valores esperables para un suelo con estas características. El contenido de agua fue bajo, con excepción del período antes de labranza, después de siembra y primer nudo, coincidiendo con los aportes de agua. En primer nudo se encontraron las mayores diferencias entre los tratamientos, donde NT IT tuvo mayor contenido de agua; para el caso de espigadura, los bajos valores se explican por la mayor demanda hídrica de la planta. Para la Ks, se registraron valores promedio entre 0,49 a 3,08 cm h⁻¹, con una tendencia a ser moderadamente alta. Respecto a NT, se observó un efecto del paso de la maquinaria después de siembra, por efecto del peso de la sembradora, mostrando los valores más bajos en el tratamiento NT IT (0,49 cm h⁻¹), seguido por CT en ambos tratamientos; los mayores valores se observaron en CT OT evaluado en espigadura (3,08 cm h⁻¹). En general se observó una mayor fluctuación de los valores de Ks en CT que en NT, el cual posee valores más constantes durante la temporada.

Palabras clave: *Triticum aestivum*, rotación de cultivos, conductividad hidráulica saturada, labranza, huella.

ABSTRACT

With the aim of evaluate the effect of the tractor transit on the hydraulic capacity of a soil, bulk density, water content and saturated hydraulic conductivity (Ks) were measured in a loam soil located in the Metropolitan Region, Chile. The study site is managed with two tillage systems, 'no tillage' (NT) and 'conventional tillage' (CT), where a wheat-rapeseed rotation is conducted. During the wheat season, soil properties were evaluated at 0-5 cm depth (n=4), at six relevant moments (before tillage, after tillage, after sowing, first knot, heading and after harvest) and in two places (inside and outside the wheel track, IT and OT respectively). The bulk density was stable in time, with values ranging between 1.17 and 1.34 Mg m⁻³, expected in this kind of soil. The water content was low, except at before tillage, after sowing and first knots evaluations, in agreement with water supply. The highest differences were found in first knot, where NT IT had the highest water content; in heading, the low values were explained by the higher water requirement of the plant. For saturated hydraulic conductivity, average values ranging between 0.49 and 3.08 cm h⁻¹ were recorded, with a tendency to be moderately high. On NT, a tractor track effect was observed after sowing due to the mass of the equipment, with the lowest Ks values in NT IT treatment (0.49 cm h⁻¹), followed by CT in both treatments; the highest Ks values were observed in CT OT measured at heading (3.08 cm h⁻¹). In general, higher variations on Ks values were observed in CT than NT, the last one showing Ks values more stable during season.

Keywords: *Triticum aestivum*, crop rotation, saturated hydraulic conductivity, tillage, wheel track.

INTRODUCCIÓN

Los suelos normalmente presentan variabilidad en sus características físicas, biológicas y químicas. Influyen en ellas los factores de formación de suelos (clima, material parental, vegetación, topografía y tiempo), determinando diferencias puntuales en el espacio-tiempo (Hillel, 2004). Las prácticas agrícolas, particularmente la labranza, constituyen un factor adicional de variación, afectando el movimiento de agua y nutrientes, el balance de carbono y nitrógeno del suelo y el crecimiento de las raíces de las plantas, en diversos casos de forma negativa (Strudley *et al.*, 2008). Esto último ha motivado la búsqueda de métodos alternativos de labranza, como la cero labranza y la labranza mínima, con el fin de disminuir el impacto causado por ésta sobre el suelo, incluyendo la pérdida de Carbono y la erosión (Haring *et al.*, 2013; Mehdizade *et al.*, 2013).

La labranza modifica las propiedades hidráulicas de los suelos al modificar la estructura y la porosidad de estos (Coutadeur *et al.*, 2002). Una propiedad que permite evaluar la capacidad de transmisión del agua en el suelo es la Conductividad Hidráulica (K) (Hillel, 2004); en este sentido, la labranza de tipo convencional crea macroporosidad temporal, la cual incrementa la conductividad hidráulica saturada (Coquet *et al.*, 2005), pero este efecto disminuye a lo largo de la temporada por un asentamiento del suelo (Alletto y Coquet, 2009). Por su parte, en la labranza conservacionista, la K puede ser menor en relación a la labranza convencional, pero su comportamiento es más estable en la temporada (Alletto y Coquet, 2009) y la tasa de infiltración, en condiciones cercanas a saturación, puede aumentar con la presencia de residuos orgánicos (Findeling *et al.*, 2003). Se ha demostrado la importancia del tamaño de los poros en el flujo de agua, en especial respecto a la infiltración, la percolación, el movimiento de solutos y contaminantes, así como en el contenido y capacidad de retención de ésta en el perfil (Luxmoore *et al.*, 1990; Kirchmann y Gerzabek, 1999; Beven y Germann, 2013). De esta forma, todo factor que pueda variar el número y las características de los poros puede afectar la capacidad de conducir agua.

Hay estudios que reflejan el impacto del paso de maquinaria sobre el suelo, evidenciando bajo la huella de las maquinarias una mayor compactación respecto a condiciones en las que no hay tránsito, exhibiendo cambios en la distribución de poros, en especial a nivel de macroporos, lo que disminuye la movilidad de agua (Strudley *et al.*, 2008). Horn *et al.* (2003) observaron el efecto deteriorante en las propiedades físicas del suelo por el paso de maquinaria; Pagliai *et al.* (2003) compararon el efecto de diferentes tipos y materiales de ruedas de tractores sobre las propiedades físicas del suelo, encontrando diferencias entre ellos, especialmente respecto a un control sin paso de maquinaria; finalmente, Schaffer *et al.* (2007) compararon las formas y estructuras de los macroporos tras el paso de maquinaria, evidenciando la pérdida de estos y un aumento en la distancia entre poros. Otros efectos de la labranza y el tránsito de maquinaria incluyen formaciones de pie de arado y sellos

superficiales, formación de flujos preferenciales y destrucción de la estructura en las primeras capas del suelo (Warrick, 2002; Hillel, 2004; Pathak *et al.*, 2011).

La comparación de K, tanto saturada como no saturada, de acuerdo al tipo de labranza en diversos suelos, ha dado resultados contradictorios (Heard *et al.*, 1988; Jonard *et al.*, 2013), debido a una amplia variabilidad tempo-espacial (Lampurlanes y Cantero-Martinez, 2006; Strudley *et al.*, 2008). Más aún, la variabilidad temporal se analiza normalmente en el largo plazo, a través de la evolución de la K a través de los años (Fuentes *et al.*, 2004).

Respecto a los efectos de la labranza en el corto plazo, existen varios estudios que evalúan la conductividad hidráulica, especialmente saturada, después de una labranza. Sin embargo, muchos de estos estudios no comprenden una temporada completa del crecimiento de una especie en particular, sino más bien, el efecto en el corto plazo. De esta manera, Osunbitan *et al.* (2005) ilustran la variación de K en suelos cultivados de Nigeria en un período de 8 semanas posterior a la siembra en sistemas de labranza cero, manual y tradicional. Sus resultados evidencian una disminución en todas de forma constante, lo que se asoció al reordenamiento de partículas posterior a la siembra. Hu *et al.* (2009) evaluaron la variación de la conductividad hidráulica, saturada e insaturada, en cuatro cultivos con diferentes manejos (*Glycine max*, una plantación de *Caragana korshinskii*, un pastizal de *Stipa bungeana* y *Medicago sativa* recién establecidos) durante cuatro meses, donde se observó un descenso de la K después del establecimiento de las especies. Sin embargo, el estudio no considera fechas importantes para ninguno de los cultivos, como las asociadas a etapas fenológicas de estos o el clima del sitio, sino que las mediciones fueron realizadas en períodos regulares de tiempo.

Por otra parte, las raíces en el suelo generan un efecto en la porosidad, dependiendo de su arquitectura. Por ejemplo, la alfalfa aumenta el número de poros gruesos debido a sus raíces gruesas y profundizadoras, lo que se repite en otros cultivos de arquitectura radical similar (Uteau *et al.*, 2013), como es el caso del raps (*Brassica napus*); sin embargo, en el caso de otros cultivos bajo riego, como por ejemplo las poáceas, el efecto de las raíces en el desarrollo de porosidad es sólo superficial (Sawchik *et al.*, 2012). Así, la alternancia de cultivos en una rotación busca no sólo optimizar el uso de nutrientes y disminuir la incidencia de enfermedades, sino alternar en el tiempo los sistemas radicales para mejorar la estructuración y disminuir la variabilidad espacial del suelo (Chan *et al.*, 2006).

En este trabajo se planteó determinar el efecto de la labranza convencional comparada con labranza cero en las zonas de tránsito y no tránsito de maquinaria sobre la conductividad hidráulica en un suelo de la Región Metropolitana, Chile, analizando la variabilidad espacial y temporal de dicha propiedad durante el cultivo de trigo de una rotación trigo-raps.

Hipótesis

La conductividad hidráulica saturada del suelo es más alta en labranza convencional que en cero labranza al comienzo de la temporada de cultivo, pero con el tiempo disminuye a valores iguales o inferiores de los que se observan en cero labranza, existiendo un efecto evidente en la huella de tránsito de un tractor.

Objetivos

Objetivo General

- Evaluar la conductividad hidráulica saturada del suelo en labranza cero y labranza convencional, bajo y fuera de la huella de tránsito en un suelo de la zona central de Chile durante el cultivo de trigo de una rotación trigo-raps.

Objetivos Específicos

- Determinar la conductividad hidráulica saturada en un suelo bajo dos sistemas de labranza, en lugares bajo y fuera de la huella de tránsito.
- Determinar la conductividad hidráulica en seis oportunidades durante la temporada de cultivo del trigo.

MATERIALES Y MÉTODO

Lugar de estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental Antumapu de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, durante el año 2014, en la fase de cultivo de trigo de una rotación trigo-raps. Según la Clasificación Climática de Köppen, el sitio de estudio se ubica en una zona climática de tipo Templado-Cálido, con estación seca prolongada de 7 a 8 meses, precipitación invernal de 366 mm, concentrada en invierno. La temperatura media anual es de 14°C, siendo enero el mes más cálido, con una temperatura media de 28,2°C y julio el mes más frío, con 4,4°C (Uribe *et al.*, 2012).

El suelo es de origen aluvial, perteneciente a la Serie Santiago, miembro de la Familia franca gruesa, sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls (Mollisol), presentando en profundidad gravas y piedras en una matriz gruesa que representa entre un 40 al 60% del volumen (CIREN, 1996).

En el lugar se encuentra el sitio de estudios en sistemas de labranza, dependiente del Laboratorio de Relación Suelo-Agua-Planta, donde se han realizado diversos estudios comparando Labranza Convencional (CT) y Cero Labranza (NT) desde el año 1997 a la fecha. El sitio de estudio tuvo una rotación trigo-maíz hasta el año 2008, fecha a partir de la cual se continuó con una rotación trigo-raps en condición de secano.

Método

Se realizó un estudio comparativo en dos ensayos, uno en Labranza Cero (NT) y el otro en Labranza Convencional (CT) en una temporada de cultivo de trigo, en el período Marzo 2014 – Enero 2015. En cada ensayo se super impuso un diseño de bloques con dos tratamientos y cuatro repeticiones. Los tratamientos correspondieron a IT: bajo la huella de paso del tractor y OT: fuera de este espacio, acrónimos que corresponden al inglés *In Track* y *Out Track* respectivamente. Estos se aplicaron en parcelas de 5m de ancho por 10 m de largo, donde se definió la unidad experimental, que consiste en la superficie demarcada por el ancho de la huella del tractor y el largo de la parcela, para el caso del tratamiento IT, mientras que el tratamiento OT corresponde a una superficie paralela y de iguales dimensiones a la del IT, separada a 0,4 m hacia la entre huella. El diseño se presenta en la Figura 1.

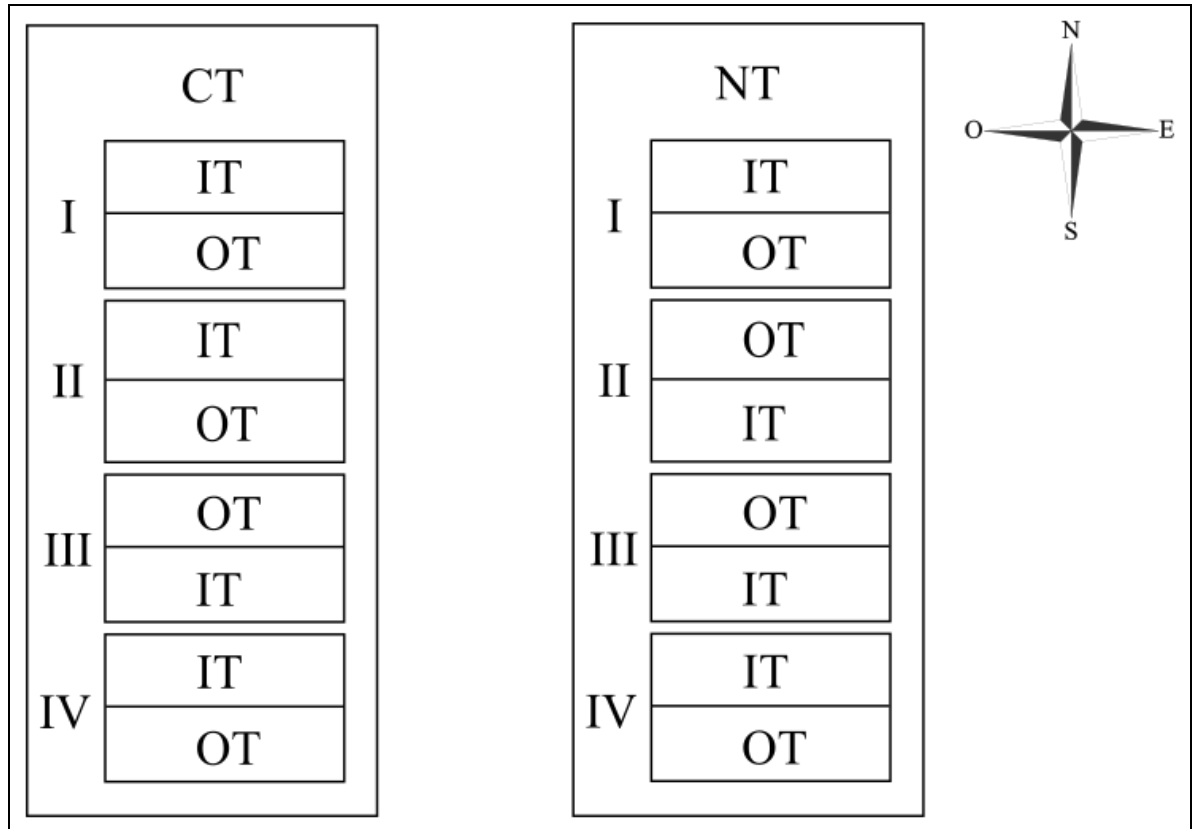


Figura 1. Diagrama del diseño experimental mostrando labranza convencional (CT) y labranza cero (NT) como 2 ensayos diferentes, con IT huella de paso de maquinaria, OT lugar sin paso. Números romanos indican repetición.

De esta manera, para cada ensayo NT y CT, se planteó un diseño en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. Al momento de sembrar se marcó el recorrido de la maquinaria con estacas. Los muestreos se realizaron en 6 momentos:

- Antes de Labranza (13 – 15 de marzo)
- Después de Labranza (Convencional) (3 – 9 de abril)
- Después de la Siembra (20 – 25 de junio)
- Primer Nudo (11 – 16 de septiembre)
- Espigadura (3 – 7 de noviembre)
- Posterior a la Cosecha (26 – 30 de enero)

En el caso de la muestra previa a la labranza, se consideró el paso anterior de maquinaria, usando como referencia residuos aplastados, existentes en ambos sistemas de labranza. El cultivo se sembró a fines de mayo, manteniéndose en condición de seco, con un riego presurizado con cañón (equivalente a 15 mm de precipitación), únicamente en el momento previo a la siembra, hasta llegar a capacidad de campo dentro de los primeros 40 cm de

profundidad, con el fin de asegurar una humedad apropiada para el establecimiento del cultivo. Se utilizó un tractor Ford 4310 año 1995 en el lugar de estudio de 4622 kg y 60 HP, donde el tratamiento IT se determinó bajo el paso de las ruedas traseras de este, con diámetro de 14,9", aro 28 y 30 cm de ancho, ejerciendo una presión de 138 kPa. En ambos ensayos se realizaron aplicaciones de agroquímicos para control de plagas. Antes de siembra se aplicaron dosis de Mancozeb y Carbendazina, nombre comercial Anagran Plus® en 125 g cada 100 kg de semilla; Imidacloprid, nombre comercial Punto 70 DS®, 100 g cada 100 kg de semilla; y Metsulfuron metil, nombre comercial Ajax®, 10 g ha⁻¹. Posterior a la siembra se realizaron dos aplicaciones de Piricarb, nombre comercial Pirimor® en dosis de 250 g ha⁻¹. En el sitio se realiza una fertilización de mantenimiento de 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅, en forma de superfosfato triple, sin aplicación de Nitrógeno. La elección de los momentos de medición se basa en cambios relevantes en el manejo (previo y posterior a la siembra) y/o en momentos fenológicos importantes para el cultivo, en el que a partir de primer nudo a espigadura se define el número de granos potencial, no existiendo un crecimiento significativo del sistema radical a partir de espigadura. Los dos sistemas de labranza, con dos tratamientos cada uno, cuatro repeticiones y seis épocas de medición, dan un total de 96 casos.

Propiedades de suelo

En trabajos previos se caracterizó la evolución temporal de las propiedades físicas del suelo (Cerdeira, 2015) y el efecto de las rotaciones sobre las mismas (Meza, 2015), concentrándose en propiedades de capacidad, de acuerdo a Horn y Fleige (2009). Estas se refieren a relaciones volumétricas de tipo escalar, no relacionadas a la funcionalidad física del suelo; entre ellas destaca la densidad aparente, la distribución de tamaño de poros y la resistencia mecánica. El presente trabajo se orientó a evaluar la conductividad hidráulica, por ser una propiedad de intensidad, con una alta relevancia en la funcionalidad del sistema poroso del suelo (Horn y Fleige, 2009).

Conductividad hidráulica

La capacidad de infiltración de agua del suelo se midió con un Mini disco infiltrómetro (Figura 2), con el fin de estimar la Conductividad Hidráulica (K) superficial en una condición cercana a saturación (Perroux y White, 1988).

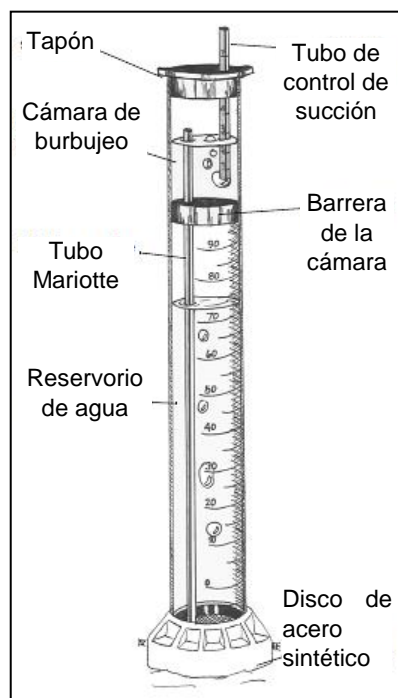


Figura 2. Mini disco infiltrómetro para mediciones de flujo de agua en condiciones no saturadas. El reservorio permite medir infiltración del agua en el suelo y el tubo de control de succión permite regular la tensión de suministro de agua. Fuente: Decagon Devices (2012).

El instrumento, basado en un Tensio-Infiltrómetro, permite hacer mediciones en condiciones de campo (Coquet *et al.*, 2005), entregando agua de un reservorio vertical a través de un disco que posee una membrana porosa en su parte inferior. Este sistema de infiltración se encuentra unido a una torre de burbujeo que actúa como retención de aire (Perroux y White, 1988), con efecto similar al de una botella de Mariotte, generando una succión que estabiliza la infiltración (Moret-Fernández *et al.*, 2012). Para este estudio, se utilizaron tensiones de suministro de 0,1; 0,2; 0,4 y 0,6 kPa. La elección de este método de medición de conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) se basa en su sencillez y facilidad de operación, utilizando volúmenes de agua bajos y en tiempos menores a los requeridos por los métodos de K saturada; además, al permitir evaluaciones cercanas a saturación, se pueden relacionar los flujos de agua a la funcionalidad del sistema poroso secundario, correspondiente a los poros gruesos, dependientes de la calidad estructural del suelo (Casanova *et al.*, 2008).

Las mediciones de capacidad hidráulica se realizaron sobre la superficie del suelo, removiendo el mulch orgánico existente en el caso de Cero Labranza, así como cortando cuidadosamente alguna planta (cultivo o maleza) si fuese necesario, de manera de no disturbar el suelo. Adicionalmente se agregó una capa de arena fina para asegurar el contacto de la membrana inferior con el suelo (Reynolds y Zebchuk, 1996).

Una vez instalado el equipo, se registró el volumen infiltrado del agua en intervalos de 30 segundos, iniciando con una tensión de -0,1 kPa hasta que se apreció un ingreso constante del agua al suelo, aproximadamente a los 10 minutos de iniciada la prueba. Una vez percibida, se repitió el procedimiento para las otras tensiones en forma creciente (-0,2; -0,4 y -0,6 kPa de presión). El volumen infiltrado se dividió por el área de la base del instrumento (15,9 cm²) para obtener la altura de agua infiltrada.

Los datos obtenidos se analizaron siguiendo el método descrito por Zhang (1997), basado en la ecuación de flujo de Richards presentada en el Anexo 1, estableciendo que para una tensión determinada h , la conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) equivale a:

$$K_{ns} = \frac{C_1}{A} \quad (1)$$

siendo C_1 la curvatura de la función determinada por la infiltración acumulada I a dicha tensión en función de la raíz del tiempo t , función de tipo polinómica descrita como:

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t} \quad (2)$$

En que C_2 es un parámetro de ajuste de la ecuación polinomial, y t tiempo; y donde A corresponde a un coeficiente adimensional que depende de la geometría de los poros, la cual se encuentra en directa relación con la clase textural (Ecuación a, Anexo 1), así como de la presión de entrada del agua. Considerando una caracterización previa realizada por Cerda (2015) en el mismo sitio de estudio, se determinó que la clase textural es franca, por lo que se utilizaron los valores señalados en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros de retención de agua en un suelo franco, y los correspondientes valores del coeficiente A para las tensiones medidas. Fuente: Decagon Devices (2012).

| | A | | | |
|---------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | -0,1 kPa | -0,2 kPa | -0,4 kPa | -0,6 kPa |
| Suelo Franco | 5,72 | 6,27 | 7,53 | 9,05 |

Los valores de K_{ns} y las tensiones de medición permitieron realizar una regresión lineal, con la que se determinó la conductividad hidráulica saturada (K_s) al igualar la tensión h a cero.

Al momento de realizar las mediciones de K_{ns} , se tomaron muestras de suelo a una distancia de 20 cm del punto de medición del mini disco infiltrómetro, con el objeto de medir la densidad aparente mediante el método del cilindro (D_a), el contenido de agua gravimétrico (P_w) y calcular el contenido de agua volumétrico ($P_v = P_w * D_a$), según metodologías señaladas por Sandoval *et al.* (2012). Esto tuvo por objetivo evaluar los

cambios estructurales durante la temporada a través de la medición de D_a , y mediante la medición de P_v se corroboraron las condiciones homogéneas de las distintas situaciones (sistema de labranza, posición respecto a la huella) al momento de medir la K_{ns} .

Análisis estadístico

Para observar y comparar el efecto de los tratamientos, así como de los sistemas de labranza en las diferentes fechas, se realizaron diversos análisis de varianza para la densidad aparente y el contenido de agua, comparando los tratamientos (huella y no huella) dentro de la misma fecha, y adicionalmente se promediaron los valores por fecha y tratamiento de los datos obtenidos y se realizaron comparaciones entre estos valores. Todos los datos obtenidos fueron comparados mediante pruebas de Tuckey.

Se realizaron ajustes de regresión tanto para infiltración acumulada estabilizada, como para conductividad hidráulica en función de la succión de entrada de agua. Se usó un modelo lineal mixto, donde se comparó la significancia de las diferencias entre los interceptos de las rectas formadas con una tensión de saturación ($h = 0$ kPa) con las cuatro repeticiones de cada tratamiento, y se realizó un análisis de varianza entre los valores por fecha y tratamiento. De igual manera, los datos obtenidos se compararon mediante una prueba de Tuckey.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades físicas en el tiempo

El suelo en el lugar de estudio es de clase textural franca, con contenidos de materia orgánica que varían entre 4,35 y 5,75% para NT, y 2,55 y 2,57% en CT, antes de siembra y en espigadura respectivamente (Cerdea, 2015).

Densidad Aparente (D_a)

El Cuadro 2 muestra los valores de D_a para los tratamientos en las distintas fechas de medición en los primeros 5 cm de suelo.

Cuadro 2. Densidad aparente (D_a , Mg m^{-3}) de los primeros 5 cm de suelo, obtenida por el método del cilindro, en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), en la huella de paso del tractor (IT) y fuera de esta (OT), en seis fechas. Cada valor con su correspondiente error estándar a su derecha.

| Fecha | Labranza | Huella | D_a (Mg m^{-3}) | | | Promedios por fecha |
|---------------------|----------|--------|------------------------------|----|-------------|---------------------|
| Antes de labranza | NT | IT | 1,26 | ab | $\pm 0,041$ | 1,25 AB |
| | | OT | 1,34 | a | $\pm 0,095$ | |
| | CT | IT | 1,18 | b | $\pm 0,015$ | |
| | | OT | 1,23 | ab | $\pm 0,027$ | |
| Después de labranza | NT | IT | 1,25 | a | $\pm 0,033$ | 1,24 AB |
| | | OT | 1,24 | a | $\pm 0,044$ | |
| | CT | IT | 1,21 | a | $\pm 0,022$ | |
| | | OT | 1,26 | a | $\pm 0,044$ | |
| Después de siembra | NT | IT | 1,32 | a | $\pm 0,027$ | 1,30 A |
| | | OT | 1,31 | a | $\pm 0,033$ | |
| | CT | IT | 1,31 | a | $\pm 0,048$ | |
| | | OT | 1,27 | a | $\pm 0,055$ | |
| Primer nudo | NT | IT | 1,29 | a | $\pm 0,034$ | 1,29 A |
| | | OT | 1,33 | a | $\pm 0,058$ | |
| | CT | IT | 1,27 | a | $\pm 0,033$ | |
| | | OT | 1,26 | a | $\pm 0,010$ | |

| Fecha | Labranza | Huella | D_a (Mg m ⁻³) | | | Promedios por fecha |
|---------------------------|----------|--------|-----------------------------|---|--------|---------------------|
| Espigadura | NT | IT | 1,21 | a | ±0,069 | 1,19 B |
| | | OT | 1,17 | a | ±0,038 | |
| | CT | IT | 1,19 | a | ±0,063 | |
| | | OT | 1,18 | a | ±0,037 | |
| Posterior a la Cosecha | NT | IT | 1,31 | a | ±0,037 | 1,26 AB |
| | | OT | 1,24 | a | ±0,016 | |
| | CT | IT | 1,27 | a | ±0,062 | |
| | | OT | 1,23 | a | ±0,048 | |
| Promedios por tratamiento | NT | IT | 1,27 | a | ±0,017 | |
| | | OT | 1,24 | a | ±0,021 | |
| | CT | IT | 1,26 | a | ±0,023 | |
| | | OT | 1,24 | a | ±0,014 | |

Letras minúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos; letras mayúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre las fechas según la prueba de Tuckey (p -value < 0,05).

Como es posible apreciar, la densidad aparente se mantuvo entre 1,18 y 1,33 Mg m⁻³, con poca variación a lo largo de la temporada, apreciándose un menor valor en espigadura. No hubo diferencias significativas entre cero labranza y labranza convencional ni entre los tratamientos IT y OT en los distintos momentos de evaluación, excepto para la observación previa a la labranza, en que se generó una interacción entre los factores (posición en la huella y sistema de labranza). Los valores obtenidos concuerdan con lo esperable en un suelo de clase textural franca, aunque en el rango bajo (Hillel, 2004), considerando que posee sobre un 50% de partículas de arena (Cerdeira, 2015). Esto puede responder a la constante soltura mecánica a la que es sometida el suelo, particularmente en CT, aunque en sistemas de labranza intensiva ocurre un rápido reasentamiento, con un incremento en la densidad aparente (Osunbitan *et al.*, 2005). Para el caso de NT, corresponde al resultado natural generado por los ciclos de humectación y secado a que es sometido en suelo (Seguel y Horn, 2006). Meza (2015) comparó la D_a en monocultivo de trigo y rotaciones con arveja, haba y raps en el mismo lugar de esta memoria, observando variaciones entre 1,14 a 1,43 Mg m⁻³ en los primeros 10 cm de suelo, concluyendo que los menores valores obedecían a una mayor densidad de raíces, como es el caso del trigo (Sawchik *et al.*, 2012).

Contenido de agua

El Cuadro 3 indica los valores de contenido de agua gravimétrico (P_w , base seca), así como el contenido de agua volumétrico (P_v) para los tratamientos en las distintas fechas de medición en los primeros 5 cm de suelo.

Cuadro 3. Contenido de agua gravimétrico (P_w , %) y volumétrico (P_v , %) en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), en los primeros 5 cm del perfil, en la huella de paso del tractor (IT) y fuera de esta (OT), en seis fechas. Cada valor con su correspondiente error estándar a su derecha.

| Fecha | Labranza | Huella | P_w (%) | | P_v (%) | | P_v por fecha | |
|---------------------------|----------|--------|-----------|----|------------|------|-----------------|---------|
| Antes de labranza | NT | IT | 12,9 | a | $\pm 0,90$ | 16,2 | $\pm 1,07$ | 16,31 B |
| | | OT | 13,4 | a | $\pm 1,10$ | 17,0 | $\pm 0,90$ | |
| | CT | IT | 12,7 | a | $\pm 0,87$ | 15,0 | $\pm 1,11$ | |
| | | OT | 14,1 | a | $\pm 1,99$ | 17,4 | $\pm 2,25$ | |
| Después de labranza | NT | IT | 6,3 | a | $\pm 0,54$ | 7,9 | $\pm 0,72$ | 6,69 C |
| | | OT | 6,9 | a | $\pm 1,77$ | 8,5 | $\pm 2,04$ | |
| | CT | IT | 4,6 | a | $\pm 0,84$ | 5,6 | $\pm 1,02$ | |
| | | OT | 3,8 | a | $\pm 0,49$ | 4,8 | $\pm 0,68$ | |
| Después de siembra | NT | IT | 19,2 | a | $\pm 1,27$ | 25,4 | $\pm 1,44$ | 23,51 A |
| | | OT | 18,6 | a | $\pm 1,16$ | 24,3 | $\pm 1,82$ | |
| | CT | IT | 18,8 | a | $\pm 0,65$ | 24,6 | $\pm 1,69$ | |
| | | OT | 15,5 | a | $\pm 0,92$ | 19,7 | $\pm 1,09$ | |
| Primer nudo | NT | IT | 12,4 | ab | $\pm 0,34$ | 15,9 | $\pm 0,77$ | 15,41 B |
| | | OT | 13,1 | a | $\pm 2,89$ | 21,2 | $\pm 3,86$ | |
| | CT | IT | 10,5 | bc | $\pm 0,76$ | 13,2 | $\pm 0,83$ | |
| | | OT | 8,9 | c | $\pm 0,62$ | 11,3 | $\pm 0,78$ | |
| Espigadura | NT | IT | 1,7 | a | $\pm 0,05$ | 2,1 | $\pm 0,16$ | 2,33 D |
| | | OT | 2,1 | a | $\pm 0,28$ | 2,5 | $\pm 0,33$ | |
| | CT | IT | 2,0 | a | $\pm 0,22$ | 2,4 | $\pm 0,24$ | |
| | | OT | 2,0 | a | $\pm 0,39$ | 2,4 | $\pm 0,50$ | |
| Posterior a la Cosecha | NT | IT | 1,2 | a | $\pm 0,04$ | 1,6 | $\pm 0,08$ | 1,51 D |
| | | OT | 1,2 | a | $\pm 0,10$ | 1,5 | $\pm 0,14$ | |
| | CT | IT | 1,2 | a | $\pm 0,20$ | 1,5 | $\pm 0,26$ | |
| | | OT | 1,1 | a | $\pm 0,13$ | 1,4 | $\pm 0,14$ | |
| Promedios por tratamiento | NT | IT | 9,0 | | $\pm 2,90$ | 11,5 | $\pm 1,37$ | |
| | | OT | 8,3 | | $\pm 2,81$ | 12,5 | $\pm 1,51$ | |
| | CT | IT | 9,7 | | $\pm 2,99$ | 10,4 | $\pm 1,33$ | |
| | | OT | 7,6 | | $\pm 2,54$ | 9,5 | $\pm 1,24$ | |

Letras minúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos; letras mayúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre las fechas según la prueba de Tuckey (p -value > 0,05).

Existió interacción entre los tratamientos y el sistema de labranza en las evaluaciones en primer nudo, donde en el sistema NT hubo un mayor contenido de agua fuera de la huella del tractor (13,1%), mientras que el valor mínimo lo registró el sistema CT en la misma posición (OT), con un valor de 8,9%. Al respecto, Mulumba y Lal (2008) destacan el efecto del *mulch* superficial del sistema de cero labranza, el cual reduce la evaporación directa desde la superficie, aumentando la disponibilidad de agua para los cultivos, observable en una tendencia a un mayor contenido de agua respecto a CT.

Como es posible apreciar, hay diferencias significativas en los contenidos de agua a lo largo de la temporada, donde los valores más altos están relacionados al riego ocurrido previo a la siembra, dejando el contenido volumétrico de agua cercano al 25%. Posteriormente el contenido de agua disminuyó en el tiempo, evidenciado principalmente en espigadura, al no presentarse lluvias por un período de 2 meses antes de la medición. Lo anterior es posible correlacionarlo con los datos presentados en la Figura 3, donde se aprecia la precipitación, junto con el momento de riego y las mediciones realizadas.

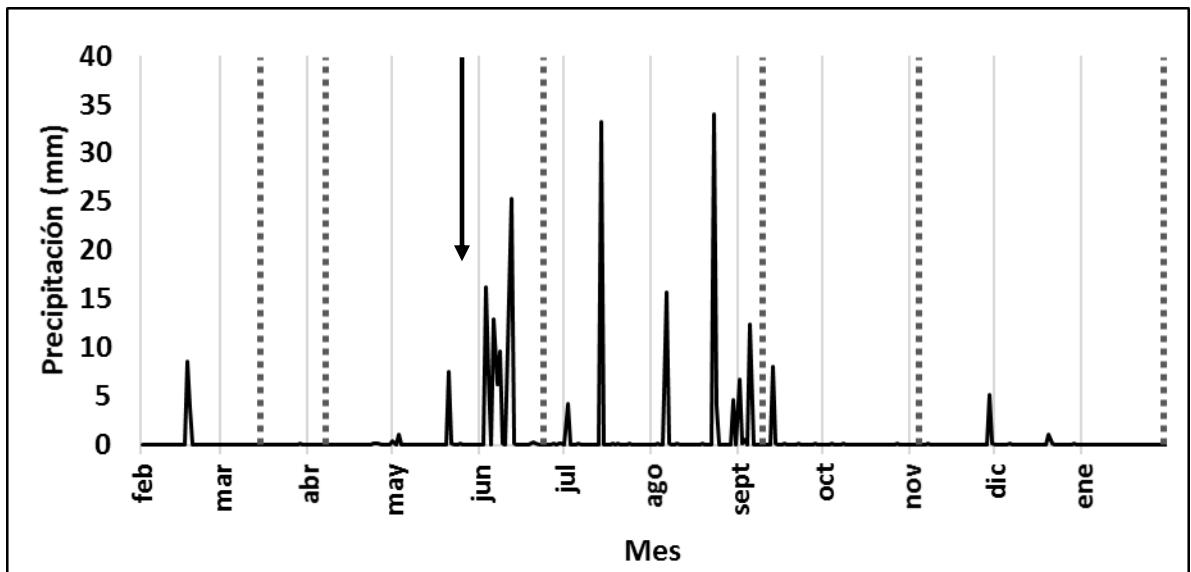


Figura 3. Precipitación (mm) en el lugar de estudio durante el período de medición. La flecha indica momento de riego, y las barras segmentadas los momentos de medición. Fuente. Agromet (2015).

Al comparar estos valores con los obtenidos por Cerda (2015), donde se obtuvieron valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para el suelo (P_v) de 28,8% y 12,4% en cero labranza, y 23,5% y 10,4% en labranza convencional respectivamente, es posible observar valores cercanos a capacidad de campo después de siembra, disminuyendo a valores incluso bajo el punto de marchitez permanente en el momento de espigadura.

Lo anterior evidencia una situación donde se puede ver afectado de forma grave el rendimiento, problema apreciable en otros estudios en secano con limitaciones del recurso hídrico (Angus y van Herwaarden, 2001; Kang *et al.*, 2002; Brunel *et al.*, 2013). En climas mediterráneos, con precipitaciones concentradas en la etapa inicial del cultivo de trigo, la demanda hídrica aumenta fuertemente en primavera, disminuyendo la disponibilidad hídrica y afectando el rendimiento final del cultivo (Fischer *et al.*, 2014).

A pesar de lo anterior, cabe destacar que los datos obtenidos obedecen a mediciones que representan los primeros 5 cm de suelo, por lo que en profundidad puede encontrarse un mayor contenido de agua, con posibilidad de extracción por la planta (Fischer *et al.*, 2014). Al respecto, Martínez *et al.* (2011) encontraron valores promedio de contenido volumétrico de agua de entre 5 y 12% en los primeros 30 cm de suelo, estudiando sistemas de labranza en rotaciones avena - trigo en un suelo franco arcillo arenoso en superficie; sin embargo, en todas las alternativas de labranza el contenido de agua aumentaba a mayor profundidad, lo que refleja la función de almacenaje del suelo. Así mismo, Meza (2015) reporta que en el suelo correspondiente a esta memoria, durante el período 2013 determinó que en los primeros 2 cm se aprecia una mayor proporción de poros de drenaje rápido, atribuyéndoselo al contenido de materia orgánica estabilizada que de forma natural posee mayor porosidad gruesa, por lo que el agua infiltrada favorece el almacenamiento de agua en profundidad.

Conductividad Hidráulica

Usando el método del minidisco infiltrómetro, la conductividad hidráulica saturada (K_s) fue obtenida a partir de su condición no saturada (K_{ns}).

Conductividad Hidráulica no Saturada

La Figura 4 permite apreciar los resultados de una prueba de infiltración realizada a distintas tensiones en una de las repeticiones del sistema CT sobre la huella del tractor.

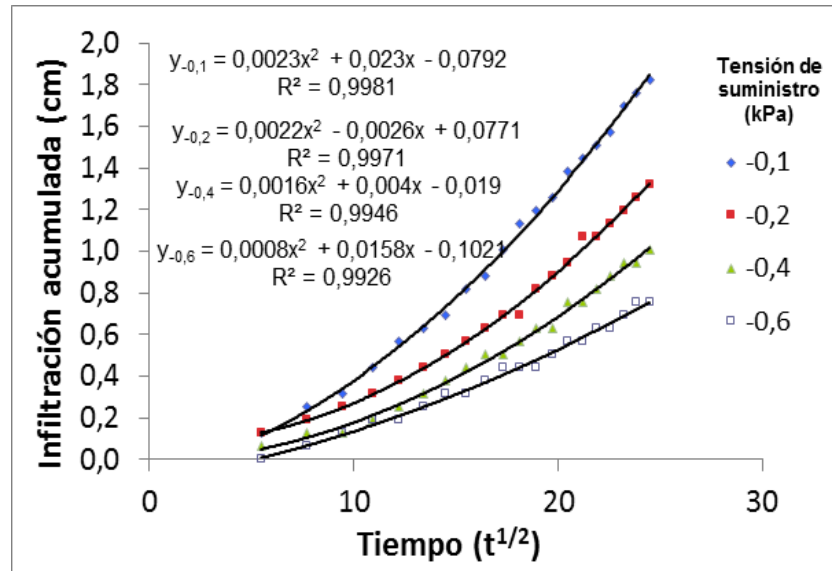


Figura 4. Infiltración acumulada de agua en el suelo (cm) respecto a la raíz cuadrada del tiempo en segundos, para la condición de labranza convencional (CT) sobre la huella de paso del tractor (IT) en un momento anterior a la siembra, para cada una de las tensiones (kPa).

Las regresiones indicadas en la Figura 4 toman la forma indicada en la ecuación (2), si se considera la raíz cuadrada del tiempo y, por lo tanto, se obtienen los valores de C_1 para cada tensión (h), equivalente a la curvatura de estas. En el Cuadro 4 se presentan los valores de C_1 correspondientes a cada tensión, con el valor de A obtenido del Cuadro 1 y el K_{ns} según la ecuación (1).

Cuadro 4. Valores de C_1 , A y conductividad hidráulica (K_h) para la condición de labranza convencional (CT) en la huella del tractor (IT) en un momento anterior a la siembra en cada tensión (h , en kPa)

| h (kPa) | C_1 | A | K_h | |
|------------|--------|------|----------------------|--------------------|
| | | | cm seg ⁻¹ | cm h ⁻¹ |
| -0,1 | 0,0023 | 5,72 | 0,00040 | 1,448 |
| -0,2 | 0,0022 | 6,27 | 0,00035 | 1,263 |
| -0,4 | 0,0016 | 7,53 | 0,00021 | 0,767 |
| -0,6 | 0,0008 | 9,05 | 0,00088 | 0,318 |

Estos valores son comparables con respecto a las otras repeticiones del mismo tratamiento, como puede observarse en la Figura 5, permitiendo obtener la conductividad hidráulica saturada (K_s) en base al intercepto en el eje Y obtenido con la regresión los datos de todas las repeticiones, resultados que se presentan más adelante.

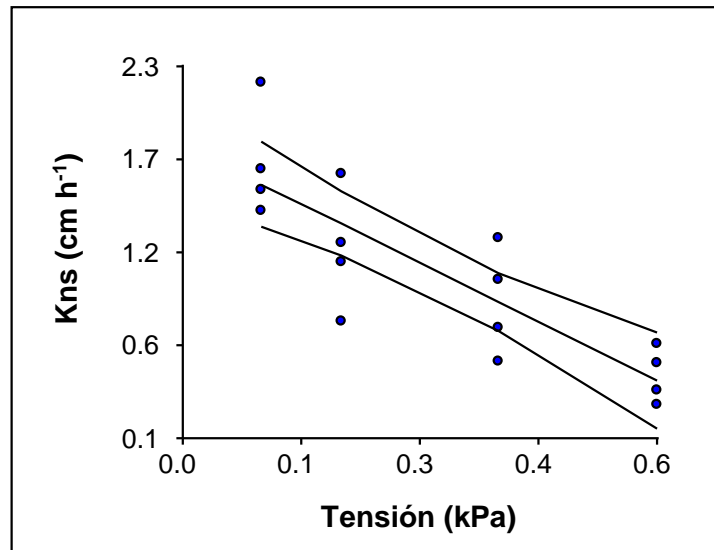


Figura 5. Conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}), respecto a la tensión de entrada del agua para cada una de las repeticiones del período anterior a la siembra en labranza convencional (CT), con paso de huella de tractor (IT). Cada círculo representa un punto para iguales tensiones en diferentes repeticiones. La recta central representa una regresión trazada a partir de los puntos y las curvas cercanas corresponden a los intervalos de confianza (p -value $<0,05$).

La conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}), como propiedad, es un indicador de la capacidad de movimiento del agua en una zona no saturada, con muchos de sus poros llenos con aire y potenciales de agua generalmente negativos (Warrick, 2002), que son afectados por la textura del suelo, su estructura, el contenido de materia orgánica y su mineralogía (Hillel, 2004).

De esta manera, se ha observado que suelos de textura fina pero bien estructurados, con alta cantidad y continuidad de macroporos, pueden poseer valores altos de K_{ns} en el rango cercano a saturación, similares a suelos de textura gruesa (Lin *et al.*, 1998; Ugarte Nano *et al.*, 2015). Keller (2012) evaluó las diferencias en los tamaños de poros con distintas estrategias de aplicación de estiércol (sin aplicación, mezclado con el suelo, en cobertura, en cobertura tapado con residuo de poda), determinando que la K_{ns} aumentó en todos los casos respecto al testigo, como consecuencia de la mayor continuidad del sistema poroso. Sin embargo, Vargas (2014) encontró valores bajos de infiltración de agua en sitios poco intervenidos debido a la abundancia de poros gruesos, que se desaturan a bajas tensiones, y a la hidrofobia causada por la materia orgánica, la cual en condición de suelo seco repele el agua e impide su infiltración (Hallet y Young, 1999). Finalmente, la mineralogía de igual manera puede tener efectos en la conductividad hidráulica. Por ejemplo, en suelos de origen volcánico, como son los Andisoles, característicos por su alta porosidad gruesa y baja densidad aparente, existe una alta continuidad del sistema poroso. Esto se traduce en una

mayor K_{ns} (Nissen *et al.*, 2005) comparable a la de suelos con contenidos altos de arena, pero estos últimos con menor capacidad de retener el agua (Bhattacharyya *et al.*, 2005). Debido a que el suelo del ensayo posee una mineralogía cristalina y una clase textural homogénea, la K_{ns} es un reflejo de la condición estructural del suelo, dependiente del contenido de materia orgánica y la porosidad secundaria generada por procesos de estructuración.

La Figura 6 ilustra los resultados promedios de K_{ns} en cada una de las fechas. El Apéndice 1 presenta los valores con sus respectivos errores estándar.

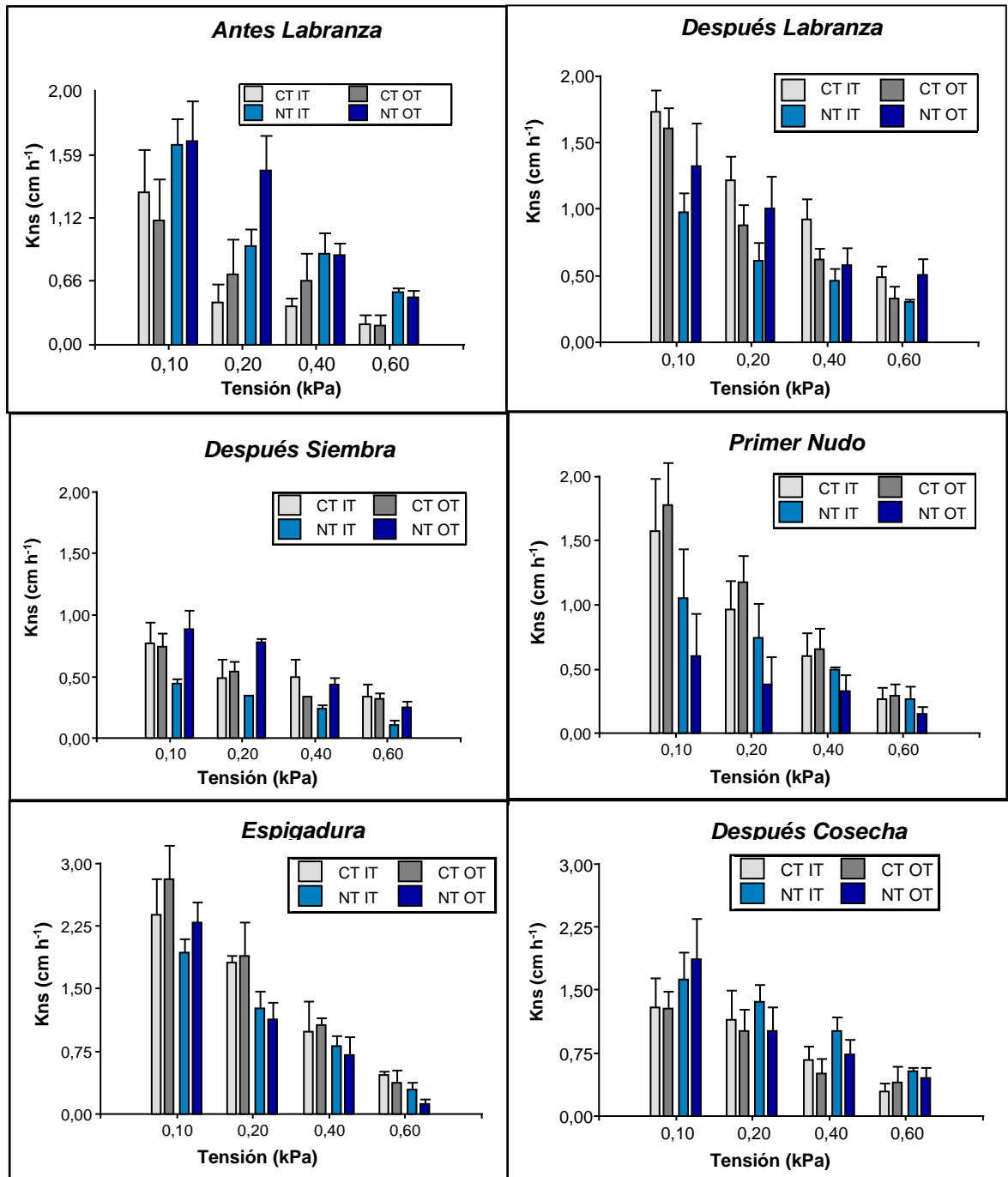


Figura 6. Conductividad hidráulica no saturada (Kns) respecto a la tensión de suministro. Promedio de las repeticiones del experimento en cada una de las fechas. Barras grises representan el ensayo en labranza convencional (CT) y azules en cero labranza (NT). Barras verticales indican el error estándar. Nótese el cambio de escala en espigadura y después de cosecha.

Existe la tendencia general en la que los valores de K_{ns} en CT son mayores a los de NT, con excepción del inicio y término de la temporada (antes de labranza y después de cosecha). El factor huella (IT v/s OT) no es evidente a las tensiones evaluadas, aunque el sistema NT tiende a presentar valores de K_{ns} mayores en el sector OT (fuera de la huella) respecto a IT, con excepción de la evaluación en primer nudo. Finalmente, el sistema CT presenta una alta variabilidad dentro de la temporada, con aumentos y disminuciones relacionadas a las labores culturales y el desarrollo del cultivo.

Antes de la labranza, los tratamientos correspondientes a CT tendieron a tener menores valores de K_{ns} para todas las tensiones respecto a NT. Esto se explica debido a que la NT, al final de la temporada previa, posee agregados pequeños y bien definidos, a diferencia de CT, en que la alteración de la estructura por labranza lleva a una regeneración de unidades más grandes (Dec *et al.*, 2008). Esto implica mayores canales de flujo en NT respecto a CT (Hunt *et al.*, 2013) al finalizar una temporada de cultivo; sin embargo la labranza es efectiva en generar macroporosidad (Cerdeira, 2015), de manera que posterior a la preparación de suelo la K_{ns} aumentó en CT.

Después de la siembra, se pudo distinguir que respecto a las demás fechas hay menores valores de K_{ns} en todo el rango de tensiones y en ambos sistemas de labranza, con un descenso mucho más marcado en ambas posiciones (IT y OT) del sistema CT y bajo la huella (IT) en el sistema NT en relación a la medición previa. Esto se debe a la ruptura de los agregados después de la labranza y a la posterior lluvia artificial causada por un riego con cañón previo a la siembra, lo que produciría sellos superficiales (Azooz y Archad, 1996; Boix-Fayos, 1997; Lado *et al.*, 2004; Martínez-Mena *et al.*, 2008). Para el caso de NT, Kayser *et al.* (2013) establecen que la compactación en los sistemas de cero labranza se genera cercano a la superficie, como consecuencia de la alta masa de la maquinaria de siembra transitando en condiciones de suelo húmedo. Si bien, el *mulch* superficial previene el daño causado por el impacto de las gotas de lluvia (Jordán *et al.*, 2010), este no es suficiente para prevenir la transmisión de la carga ejercida hacia el suelo.

Con el desarrollo del cultivo existe una recuperación de la K_{ns} , primero en CT, fácilmente observable en primer nudo y luego en NT, apreciable en espigadura, donde se pueden apreciar los mayores valores en ambos casos. Esto puede ser explicado por la regeneración natural de la estructura, dado por los ciclos de humectación y secado que restituyen la continuidad porosa (Dec *et al.*, 2008). A esto se suma la propia actividad de raíces del cultivo, que al aumentar su consumo de agua entre primer nudo y espigadura debido a un activo crecimiento (Fischer *et al.*, 2014) genera un secado del suelo, favoreciendo la unión de las partículas sólidas. Por otra parte, la muerte y regeneración de raíces va dejando canales nuevos y continuos para el movimiento de fluidos (Osunbitan *et al.*, 2005). Finalmente, en madurez fisiológica es posible observar un retorno a valores similares a antes de labranza.

Conductividad Hidráulica Saturada

Obtenida la K_{ns} y siguiendo el modelo planteado, la aproximación a través de regresión a una tensión igual a cero de los datos equivale a la conductividad hidráulica saturada, valores que se presentan en el Cuadro 5 con sus respectivas comparaciones en una misma fecha.

Cuadro 5. Conductividad hidráulica saturada (K_s , cm h^{-1}) en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), en la huella de paso del tractor (IT) y fuera de esta (OT), en seis fechas, cada valor con su correspondiente error estándar.

| Fecha | Labranza | Huella | K_s (cm h^{-1}) | | Promedios por fecha |
|---------------------|----------|--------|------------------------------|------------|---------------------|
| Antes de labranza | NT | IT | 1,58 a | $\pm 0,20$ | 1,46 B |
| | | OT | 1,89 b | $\pm 0,29$ | |
| | CT | IT | 1,22 a | $\pm 0,21$ | |
| | | OT | 1,25 a | $\pm 0,37$ | |
| Después de labranza | NT | IT | 0,99 a | $\pm 0,16$ | 1,45 B |
| | | OT | 1,38 b | $\pm 0,30$ | |
| | CT | IT | 1,83 b | $\pm 0,19$ | |
| | | OT | 1,59 b | $\pm 0,20$ | |
| Después de siembra | NT | IT | 0,49 ab | $\pm 0,04$ | 0,76 C |
| | | OT | 1,01 b | $\pm 0,16$ | |
| | CT | IT | 0,75 b | $\pm 0,17$ | |
| | | OT | 0,77 b | $\pm 0,11$ | |
| Primer nudo | NT | IT | 1,13 ab | $\pm 0,40$ | 1,32 BC |
| | | OT | 0,63 a | $\pm 0,31$ | |
| | CT | IT | 1,63 bc | $\pm 0,41$ | |
| | | OT | 1,89 c | $\pm 0,36$ | |
| Espigadura | NT | IT | 2,07 a | $\pm 0,13$ | 2,54 A |
| | | OT | 2,34 a | $\pm 0,33$ | |
| | CT | IT | 2,68 ab | $\pm 0,37$ | |
| | | OT | 3,08 b | $\pm 0,37$ | |
| Después de cosecha | NT | IT | 1,82 a | $\pm 0,34$ | 1,64 B |
| | | OT | 1,84 a | $\pm 0,48$ | |
| | CT | IT | 1,51 a | $\pm 0,40$ | |
| | | OT | 1,39 a | $\pm 0,25$ | |

Letras mayúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre las fechas según la prueba de Tukey (p -value $< 0,05$); letras minúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos para cada período según modelo lineal mixto, con pruebas de hipótesis secuenciales y marginales, en base a los coeficientes de los efectos fijos (p -value $< 0,05$).

Al considerar todo el set de datos, de manera de establecer interacciones entre los diversos factores, el Cuadro 6 muestra los resultados de las pruebas de análisis de varianza.

Cuadro 6. Análisis estadístico de los valores de conductividad hidráulica saturada, con los valores F asociados y p-valor

| | F | p-valor |
|----------------------------------|----------|----------------|
| Labranza | 1,76 | 0,2324 |
| Huella | 1,08 | 0,3017 |
| Tiempo | 29,92 | <0,0001 * |
| Labranza * Huella | 0,14 | 0,7084 |
| Labranza * Tiempo | 3,53 | 0,007 * |
| Huella * Tiempo | 0,41 | 0,8436 |
| Labranza *Huella * Tiempo | 0,73 | 0,6025 |

Asteriscos indican que existen diferencias estadísticamente significativas en los factores (p-value <0,05)

Como es posible observar, existe interacción estadísticamente significativa para los factores labranza y tiempo. Al respecto, el Cuadro 7 ilustra las diferencias determinadas por el análisis; sin embargo, debido a que este análisis no se considera en los objetivos del trabajo, el énfasis de la discusión se centrará en los resultados obtenidos en el Cuadro 5.

Cuadro 7. Conductividad hidráulica saturada (K_s , cm h^{-1}) en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), en seis fechas, cada valor con su correspondiente error estándar.

| Tiempo | NT | | | CT | | |
|----------------------------|-----------|------------|------|-----------|------------|------|
| Antes de labranza | 1,69 | $\pm 0,20$ | abcd | 1,24 | $\pm 0,20$ | abc |
| Después de labranza | 1,16 | $\pm 0,20$ | abc | 1,71 | $\pm 0,20$ | bcd |
| Después de siembra | 0,73 | $\pm 0,23$ | a | 0,75 | $\pm 0,20$ | ab |
| Primer nudo | 0,87 | $\pm 0,20$ | abc | 1,77 | $\pm 0,20$ | cd |
| Espigadura | 2,25 | $\pm 0,20$ | de | 2,82 | $\pm 0,20$ | e |
| Después de cosecha | 1,79 | $\pm 0,20$ | cd | 1,43 | $\pm 0,20$ | abcd |

Letras minúsculas indican diferencias estadísticamente significativas entre las fechas según la prueba de Tukey (p-value <0,05).

Según la clasificación descrita por Schoeneberger *et al.* (2012), el suelo tuvo una K_s moderadamente alta durante todo el período de estudio. Como es posible observar en el Cuadro 5, los valores de conductividad poseen diferencias significativas tanto en el tiempo como en los tratamientos. Se presentan diferencias en todas las fechas de medición, con excepción del momento de cosecha, fecha en la cual no se observaron diferencias estadísticamente significativas. Así, la conductividad hidráulica al inicio de la temporada

tuvo un promedio de $1,46 \text{ cm h}^{-1}$, apreciándose una disminución en el tiempo, con el valor más bajo de $0,74 \text{ cm h}^{-1}$ una vez efectuada la siembra, para volver a aumentar en primer nudo y llegar a un máximo en espigadura ($2,54 \text{ cm h}^{-1}$) y finalmente una nueva disminución en madurez fisiológica. En la Figura 7 es posible apreciar esta variación de forma gráfica.

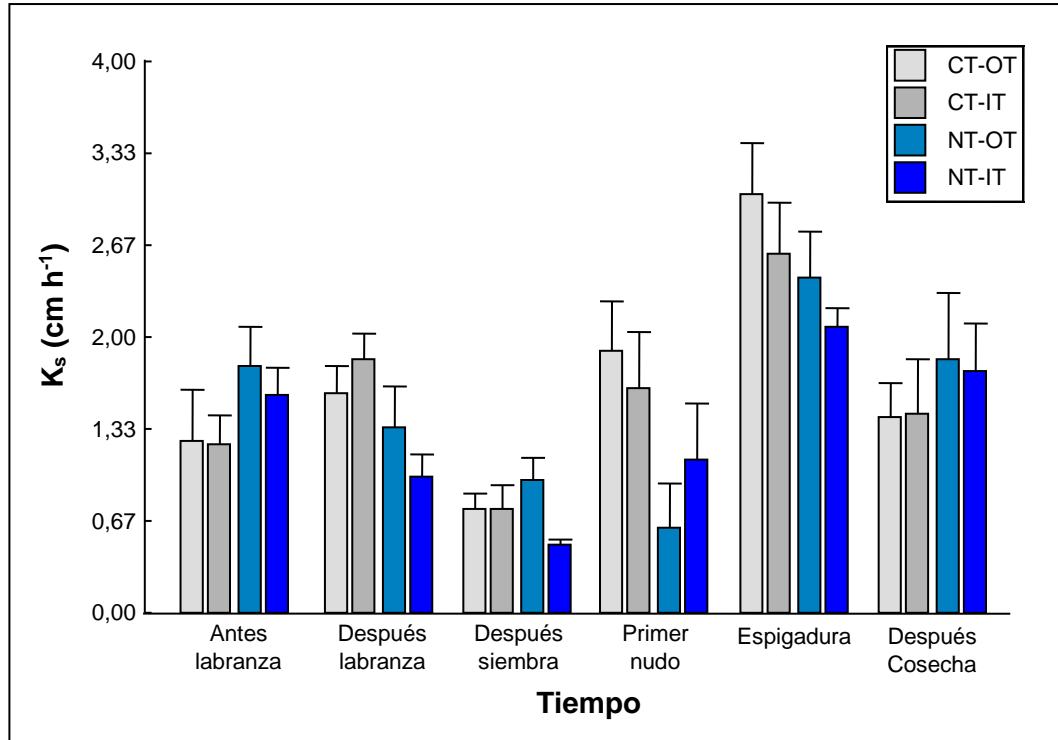


Figura 7. Conductividad hidráulica saturada (K_s) calculada para cada período de tiempo, tanto para labranza convencional (CT, en gris) como para cero labranza (NT, en azul); así como en los tratamientos fuera de la huella (más claro) y dentro de esta (más oscuros). Líneas verticales sobre las barras indican el error estándar.

La ausencia de labranza en el sistema NT genera una porosidad estable, con valores mayores fuera de la huella del tractor (OT) en relación a la condición bajo huella (IT) en las tres primeras fechas de evaluación. Sin embargo, las lluvias iniciales generan un hinchamiento del suelo en el caso de NT-OT, con un descenso fuerte en la K_s medida en primer nudo. Lo anterior no ocurre en NT-IT, que tuvo un descenso general en el tiempo por la aplicación de estreses mecánicos, efecto similar a lo observado por Dörner *et al.* (2009) en un Andisol del sur de Chile, donde el estrés mecánico dificultaba la capacidad de hinchamiento del suelo por efecto del aumento de los puntos de contacto de las estructuras. Posteriormente la K_s se recuperó en primer nudo debido a la intensificación del secado, que provocó grietas con alta continuidad (Bhattacharyya *et al.*, 2005).

Para el sistema CT, a modo general, es posible apreciar el efecto del uso de maquinaria, donde el movimiento del suelo aumentó la K_s una vez efectuada la labranza, tanto para el

lugar de paso de huella como fuera de este, desde 1,22 a 1,83 cm h⁻¹ y 1,25 a 1,59 cm h⁻¹ respectivamente, la que después disminuyó llegando a su menor valor una vez efectuada la siembra. La recuperación de la K_s, como era de esperar, responde tanto a la intensificación de los ciclos de humectación y secado como a la actividad de raíces del cultivo, ambos factores son cruciales para la recuperación de la porosidad del suelo (Semmel *et al.*, 1990; Zúñiga *et al.*, 2015)

Durante gran parte del período en el que el cultivo estuvo establecido, el valor de la K_s fue superior en CT, pero sin embargo durante el período antes de labranza y posterior a la cosecha los mayores valores fueron registrados en NT. Lo anterior coincide con otros estudios, como el realizado por Fuentes *et al.* (2004), quienes en períodos de medición más amplios encontraron que la conductividad hidráulica saturada en el suelo fue más alta en NT durante el periodo sin cultivar y después de la cosecha del trigo, con una disminución marcada en CT una vez cultivado el trigo.

Alletto y Coquet (2009) encontraron una disminución gradual a través del tiempo de la K_s, y en general valores menores en los lugares del paso de huella que fuera de este. Wahl *et al.* (2004) encontraron una correlación de los valores de infiltración con la macroporosidad, y la dinámica del tiempo estaría dada por la soltura mecánica inicial y el posterior asentamiento del suelo. En el período de estudio, la conductividad hidráulica saturada llegó a su máximo en espigadura, con valores de 2,68 y 3,08 cm h⁻¹ en IT y OT respectivamente, para comenzar un nuevo descenso en madurez fisiológica. Bormann y Klaassen (2008) explican que la dinámica hídrica del suelo depende en mayor medida de las propiedades físicas del suelo junto a otros factores intrínsecos de este, pero el aumento estaría condicionado también por efecto de la demanda de agua de la planta. Lo anterior es contrastante con otros estudios, que indican que no existen cambios de la K_s en este período (Angulo-Jaramillo *et al.*, 1997; Alletto y Coquet, 2009), dado que las propiedades intrínsecas del suelo poseen mayor relevancia que los factores externos y tienden a mantenerse constantes en el corto plazo; en este caso, el alto contenido de pedregosidad con una matriz arenosa en el subsuelo que permitieron mantener niveles de conductividad hidráulica saturada cercanos a 3 cm h⁻¹ en todas las mediciones.

En el caso de NT, la K_s fue inicialmente más alta que CT, disminuyendo marcadamente en la segunda medición, a pesar de no haberse disturbado el suelo de manera alguna en este período, llegando a un mínimo después de la siembra, con los valores más bajos registrados en el estudio, entre 0,49 y 1,01 cm h⁻¹. Lo anterior puede ser efecto de la compactación efectuada sobre el terreno en la siembra, y al respecto hay registros del efecto del peso de la maquinaria en la densificación de la superficie del suelo en este mismo sector (Martínez *et al.*, 2008). Continuando en la temporada, se observó una recuperación en la medición en primer nudo en el caso del paso de huella, con una disminución fuera de esta. De forma similar que CT, al llegar a espigadura los valores aumentaron alrededor de dos veces respecto al período anterior, sin embargo, manteniéndose por debajo de los

correspondientes a CT. Finalmente, los valores de K_s se mantuvieron estables y más altos que CT al llegar a cosecha, lo que probablemente se deba a una mayor actividad biológica de un sistema NT, que es favorecido por un mayor contenido de MO del suelo, de acuerdo a Lampurlanés y Cantero-Martínez (2006).

CONCLUSIONES

Para un suelo franco sometido a rotación de cultivos en un clima mediterráneo, es posible indicar que el paso de la maquinaria y el tipo de labranza poseen un efecto en las propiedades físicas del suelo, en específico de la conductividad hidráulica saturada, en los primeros 5 cm del perfil de suelo.

A lo largo de la temporada se observó una baja variación de la densidad aparente, no observándose diferencias estadísticamente significativas según la posición en la huella y el sistema de labranza. En el caso del contenido de agua, existió una variación temporal tras el riego previo a la siembra, sin diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, salvo en primer nudo, donde la labranza convencional presentó los menores valores. En ambos sistemas de labranza, al llegar a espigadura se observaron niveles de contenido de agua deficientes para el crecimiento del cultivo, asociable a la mayor demanda de agua en esta época.

La conductividad hidráulica saturada (K_s) no tuvo diferencias entre posición (huella y no huella) en el sistema CT, en tanto el sistema NT, la K_s fuera de la huella del tractor fue mayor a la posición bajo huella hasta la medición posterior a la siembra, igualándose desde que se alcanza el primer nudo y durante el resto de la temporada. Para el caso de los sistemas de labranza, con excepción de después de cosecha, para cada uno de los periodos se observaron diferencias entre ellos, donde en NT IT se observó el menor valor una vez efectuada la siembra. En NT se observó un efecto del peso de la maquinaria usada para la siembra, manteniendo los valores por debajo de CT, pero con una recuperación apreciable en espigadura, con valores incluso más altos que CT en la evaluación posterior a la cosecha.

BIBLIOGRAFÍA

- Agromet. 2015. [en línea]. Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Disponible en: <<http://agromet.inia.cl>> Consultado el: 05 de julio de 2015.
- Alletto, 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. doi:10.1016/j.geoderma.2009.05.023.
- Angulo-Jaramillo, R., F. Moreno, B. Clothier, J. Thony, G. Vachaud, E. Fernandez-Boy *et al.* 1997. Seasonal variation of hydraulic properties of soils measured using a tension disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal*. 61: 27-32. doi: 10.2136/sssaj1997.03615995006100010005x.
- Angus, J. and A. van Herwaarden. 2001. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. *Agronomy Journal* 93: 290-298. doi:10.2134/agronj2001.932290x.
- Azooz, R. and M. Arshad. 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Canadian Journal of Soil Sciences*. 76: 143-152. doi:10.4141/cjss96-021.
- Beven, K. and P. Germann. 2013. Macropores and water flow in soils revisited. *Water Resources Research* 49: 3071-3092. doi:10.1002/wrcr.20156.
- Bhattacharyya R., V. Prakash, S. Kundu and H.S. Gupta. 2005. 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. doi:10.1016/j.still.2005.02.018.
- Boix-Fayos, C. 1997. The roles of texture and structure in the water retention capacity of burnt Mediterranean soils with varying rainfall. *Catena*. 31: 219-236. doi:10.1016/S0341-8162(97)00041-6
- 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. doi:10.1016/j.geoderma.2008.03.017.
- Brunel, N; O. Seguel and E. Acevedo. 2013. Conservation tillage and water availability for wheat in the dryland of central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition* 13: 622-637. doi:10.4067/S0718-95162013005000050.
- Casanova M., Seguel O., Haberland J., Kremer C. 2008. Propiedades físicas: indicadores de calidad y salud de suelos. *Antumapu. Revista de extensión agropecuaria y medio ambiente* 6 (1-2): 32-34.
- Cerda, J. 2015. Variabilidad temporal y espacial de las propiedades físicas de suelo en sistemas de labranza cero y tradicional en un Mollisol de la zona central de Chile. Memoria de Título Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 40p.

- Chan, K.Y., A. Oates, A.D. Swan, R.C. Hayes, B.S. Dear and M.B. Peoples. 2006. Agronomic consequences of tractor wheel compaction on a clay soil. *Soil & Tillage Research* 89: 13-21. doi:10.1016/j.still.2005.06.007.
- CIREN. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripción de suelos materiales y símbolos. Publicación N°115. Santiago de Chile. 132 p.
- Coquet, Y., P. Vachier and C. Labat. 2005. Vertical variation of near-saturated hydraulic conductivity in three soil profiles. *Geoderma* 126: 181-191. doi:10.1016/j.geoderma.2004.09.014.
- Coutadeur, C., Y. Coquet and J. Roger-Estrade. 2002. Variation of hydraulic conductivity in a tilled soil. *European Journal of Soil Science* 53: 619-628. doi:10.1046/j.1365-2389.2002.00473.x.
- Dec, D., J. Dörner, O. Becker-Fazekas and R. Horn. 2008. Effect of bulk density on hydraulic properties of homogenized and structured soils. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 8: 1-13. ISSN 0718-2791.
- Decagon Devices. 2012. Mini Disk Infiltrometer. User's Manual Version 10. [En línea]. [Estados Unidos]. Recuperado en <http://manuals.decagon.com/Manuals/10564_Mini%20Disk%20Infiltrometer_Web.pdf> Consultado el: 14 de diciembre de 2013.
- Dörner, J., D. Dec, X. Peng and R. Horn. 2009. Change of shrinkage behavior of an Andisol in southern Chile: Effects of land use and wetting/drying cycles. *Soil & Tillage Research*. 106: 45-53. doi:10.1016/j.still.2009.09.013.
- Findeling, A., S. Ruy and E. Scopel. 2003. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. *Journal of Hydrology* 275: 49-66. doi:10.1016/s0022-1694(03)00021-0.
- Fischer R.A., D. Byerlee and G.O. Edmeades. 2014. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph No. 158. Australian Centre for International Agricultural Research: Canberra. 634 pp. ISBN 978-1-925133-06-6.
- Fuentes, J., M. Flury and D. D. Bezdicek. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till, and no-till. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 1679-1688. doi:10.2136/sssaj2004.1679.
- Hallet, P.D. and I.M. Young. 1999. Changes to water repllece of soil aggregates caused by substrate-induced mocrbial activity. *European Journal of Soil Science*. 50: 35-40. doi: 10.1046/j.1365-2389.1999.00214.x.
- Haring, V., H. Fischer, G. Cadisch and K. Stahr. 2013. Implication of erosion on the assessment of decomposition and humification of soil organic carbon after land use change in tropical agricultural systems. *Soil Biology & Biochemistry* 65: 158-167. doi:10.1016/j.soilbio.2013.04.021.
- Heard, J.R., E.J. Kladivko and J.V. Mannering. 1988. Soil macroporosity, hydraulic conductivity and air permeability of silty soils under long-term conservation tillage in Indiana. *Soil & Tillage Research* 11: 1-18. doi:10.1016/0167-1987(88)90027-x.

- Hillel, D. 2004. Introduction to Environmental Soil Physics. Elsevier Science. 494p.
- Horn, R. and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil & Tillage Research* 102: 201-208. doi:10.1016/j.still.2008.07.015
- Horn, R., T. Way and J. Rostek. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil & Tillage Research* 73: 101-106. doi:10.1016/s0167-1987(03)00103-x.
- Hu, W., M. Shao, Q. Wang, J. Fan and R. Horton. 2009. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses. *Geoderma*. 149: 355-366. doi:10.1016/j.geoderma.2008.12.016.
- Hunt, G., B. Ghanbarian and K. Saville. 2013. Unsaturated hydraulic conductivity modeling for porous media with two fractal regimes. *Geoderma*. 207: 268-278. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.05.023.
- Jonard, F., M. Mahmoudzadeh, C. Roisin, L. Weihermuller, F. Andre, J. Minet, *et al.* 2013. Characterization of tillage effects on the spatial variation of soil properties using ground-penetrating radar and electromagnetic induction. *Geoderma* 207: 310-322. doi:10.1016/j.geoderma.2013.05.024.
- Jordán, A., L. Zavala and J. Gil. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena*. 81: 77-85. doi:10.1016/j.catena.2010.01.007.
- Kang, S., L. Zhang, Y. Liang, X. Hu, H. Cai and B. Gu. 2002. Effects of limited irrigation on yield and water efficiency of winter wheat in the Loess Plateau of China. *Agricultural Water Management* 55: 203-216. doi:10.1016/S0378-3774(01)00180-9.
- Kayser, D., M. Rodrigues, J. Riechert, D. Reinert, R. Horn, H. Fleige *et al.*, 2013. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the subtropics and tropics: A review. In: Krümmelbein, J, R. Horn, and M. Pagliai (Eds.), Soil degradation. Advances in Geocology. 42: 242-339. Reiskirchen, Germany. ISBN 978-3-923381-59-3.
- Keller, K. 2012. Evaluación de la dinámica del agua en suelos con aplicación de enmiendas orgánicas bajo riego por goteo. Memoria de Título Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 76p.
- Kirchmann, H. and M.H. Gerzabek. 1999. Relationship between soil organic matter and micropores in a long-term experiment at Ultuna, Sweden. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 162: 493-498. doi:10.1002/(sici)1522-2624(199910)162:5<493::aid-jpln493>3.0.co;2-s.
- Lado, M., A. Paz and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration seal formation, and soil loss. *Soil Science Society of America Journal*. 68: 935-942. doi:10.2136/sssaj2004.9350.
- Lampurlanes, J. and C. Cantero-Martinez. 2006. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. *Soil & Tillage Research* 85: 13-26. doi:10.1016/j.still.2004.11.006.

- Lin, H., K. McInnes, L. Wilding and C. Hallmark. 1998, jan. Macroporosity and initial moisture effects on infiltration rates in vertisols and vertic intergrades. *Soil Science*. 163: 2-8. doi: 10.1097/00010694-199801000-00002.
- Luxmoore, R.J., P.M. Jardine, G.V. Wilson, J.R. Jones and L.W. Zelazny. 1990. Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. *Geoderma* 46: 139-154. doi:10.1016/0016-7061(90)90012-x.
- Martínez, E., J.P. Fuentes, P. Silva, S. Valle and E. Acevedo. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and conventional tillage systems in a Mediterranean environment of Chile. *Soil & Tillage Research*. 99: 232-244. doi: 10.1016/j.still.2008.02.001.
- Martínez, I., C. Ovalle, A. Del Pozo, H. Uribe, N. Valderrama, C. Prat *et al.* 2011. Influence of conservation tillage and soil water content on crop yield in dryland compacted alfisol of central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71: 615-622. doi: 10.4067/S0718-58392011000400018
- Martinez-Mena, M.; J. Lopez, M. Almagro, C. Boix-Fayos and J. Albaladejo. 2008. Effect of water erosion in a semiarid area of South-East Spain. *Soil & Tillage Research*. 99: 119-129. doi:10.1016/j.still.2008.01.009.
- Mehdizade, B., H. Asadi, M. Shabanpour and H. Ghadiri. 2013. Impact of erosion and tillage on the productivity and quality of selected semiarid soils of Iran. *International Agrophysics* 27: 291-297. doi:10.2478/v10247-012-0097-4.
- Meza, D. 2015. Efecto de la rotación de cultivos sobre las propiedades físicas de un suelo manejado en cero labranza. Memoria de Título Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 37p.
- Moret-Fernandez, D., C. Gonzalez-Cebollada, and B. Latorre. 2012. Microflowmeter-tension disc infiltrometer - Part I: Measurement of the transient infiltration rate. *Journal of Hydrology* 466: 151-158. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.07.011
- Mulumba, L. and R. Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil & Tillage Research*. 98: 106-111. doi:10.1016/j.still.2007.10.011.
- Nissen, J., C. Quiroz, O. Seguel, R. Mac Donald y A. Ellies. 2005. Variación del potencial mátrico durante el movimiento de agua en andisoles. *Agro Sur*. 33: 36-47. ISSN 0304-8802.
- Osunbitan, J., D. Oyedele and D. 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. doi:10.1016/j.still.2004.05.007.
- Pagliai, M., A. Marsili, P. Servadio, N. Vignozzi and S. Pellegrini. 2003. Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil & Tillage Research* 73: 119-129. doi:10.1016/s0167-1987(03)00105-3.
- Pathak, P.; S. Wani and R. Rao Sudi. 2011. 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.

- Perroux, K. and I. White. 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Science Society of America Journal* 52: 1205-1215. doi:10.2136/sssaj1988.03615995005200050001x
- Reynolds, W. and W. Zebchuk. 1996. Use of contact material in tension infiltrometer measurements. *Soil Technology* 9(3): 141-159. doi:10.1016/S0933-3630(96)00009-8
- Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción, Chillán, Chile. 80p.
- Sawchik, I.; M Pérez-Bidegain and C. García. 2012. Impact of winter cover crops on soil properties under soybean cropping systems. pp: 288-293. In: Ernst, O.; Pérez-Bidegain, M.; Terra, J.; Barbazán, M. (eds.). Agrocienza Uruguay. Special Issues. Striving for sustainable high productivity through improved soil and crop management. 344p.
- Schaffer, B., M. Stauber, R. Muller and R. Schulin. 2007. Changes in the macro-pore structure of restored soil caused by compaction beneath heavy agricultural machinery: a morphometric study. *European Journal of Soil Science* 58: 1062-1073. doi:10.1111/j.1365-2389.2007.00886.x.
- Schoeneberger, P., D. Wysocki, E. Benham and Soil Survey Staff, 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- 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: 221-232. doi: 10.1002/jpln.200521854
- Semmel, H.; R. Horn; A. Dexter and E. Schulz. 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology* 3(2). 113-129.
- Strudley, M.W., T.R. Green and J.C. Ascough. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil & Tillage Research* 99: 4-48. doi:10.1016/j.still.2008.01.007.
- Ugarte Nano, C.C, B. Nicolardot and M. Ubertosi. 2015, jul. Near-saturated hydraulic conductivity measured on a swelling silty clay loam for three integrated weed management based cropping systems. *Soil & Tillage Research*. 150: 192-200. doi: 10.1016/j.still.2015.02.003.
- Uribe, J.M.; R. Cabrera; A. dDe Lla Fuente y M. Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Santiago de Chile: Universidad de Chile. 232p.
- Uteau, D., S.K. Pagenkemper, S. Peth and R. Horn. 2013. Root and time dependent soil structure formation and its influence on gas transport in the subsoil. *Soil & Tillage Research* 132: 69-76. doi:10.1016/j.still.2013.05.001.
- Vargas, D. 2014. Evaluación del uso del Minidisco Infiltrómetro para la determinación *in situ* de la hidrofobia de suelos. Memoria de Título Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile: Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 65p.
- Wahl, N., O. Bens, U. Buczko, E. Hangen and R. Hüttl. 2004. Effects of conventional and conservation tillage on soil hydraulic properties of a silty-loamy soil. *Physics and Chemistry of the Earth*. 29: 821-829. doi:10.1016/j.pce.2004.05.009.
- Warrick, A. 2002. Soil Physics Companion. CRC Press. 389p.

- Zhang, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. *Soil Science Society of America Journal* 61: 1024-1030. doi:10.2136/sssaj1997.03615995006100040005x.
- Zúñiga, F.; J. Ivelic-Sáez; I. López; D. Huygens and F. J. Dörner. 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. *Soil & Tillage Research* 145: 233-241. doi:10.1016/j.still.2014.09.014

Anexo 1

Ecuación de Richards y su derivación a Zhang (Zhang, 1997).

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r K(h) \frac{\partial h}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (3)$$

Donde Θ es el contenido volumétrico de agua, h la presión de entrada, z profundidad, r coordenada radial, t tiempo y $K(h)$ es la función de conductividad hidráulica saturada.

Para el uso del Minidisco infiltrómetro se requieren las siguientes consideraciones.

$$h(r, z, 0) = h_i \quad (4)$$

$$h(r, 0, t) = h_0; 0 < r < r_0 \quad (5)$$

$$-\frac{\partial h}{\partial z} + 1 = 0 \text{ si } z = 0; r > r_0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial h}{\partial r} = 0 \text{ si } r \rightarrow \infty \quad (7)$$

$$\frac{\partial h}{\partial z} = 0 \text{ si } z \rightarrow \infty \quad (8)$$

Con h_i presión de entrada del suelo, r_0 el radio del disco y h_0 tensión de entrada del infiltrómetro.

Junto a esto, datos de simulación de flujos de infiltración acumulada en base al método de Marquardt de máxima cercanía permite determinar la ecuación ajustada en (1), con C_1 equivalente a la curvatura del ajuste realizado y A coeficiente definido como:

$$A = \frac{11,65(n^{0,1} - 1) \exp[2,92(n - 1,9)\alpha h]}{(\alpha r)^{0,91}}; \text{ si } n \geq 1,9$$

$$A = \frac{11,65(n^{0,1} - 1) \exp[7,5(n - 1,9)\alpha h]}{(\alpha r)^{0,91}}; \text{ si } n < 1,9 \quad (9)$$

Con n y α parametros de retención dependientes de la clase textural, y r radio de la base del instrumento (Zhang, 1997), que en este experimento es de 2,25 cm.

Apéndice 1

Conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) respecto a la tensión de suministro en labranza convencional (CT) y en cero labranza (NT), con tratamientos fuera de huella (OT) y en la huella (IT) de paso del tractor. Cada valor con su correspondiente error estándar a la derecha.

| | | | Tensión (kPa) | | | |
|---------------------|----|----|---------------|------------|------------|------------|
| | | | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 |
| Antes de labranza | NT | IT | 1,65 ±0,19 | 0,92 ±0,12 | 0,86 ±0,14 | 0,58 ±0,03 |
| | | OT | 1,68 ±0,29 | 1,46 ±0,26 | 0,85 ±0,09 | 0,54 ±0,05 |
| | CT | IT | 1,31 ±0,31 | 0,50 ±0,13 | 0,48 ±0,05 | 0,34 ±0,07 |
| | | OT | 1,10 ±0,31 | 0,71 ±0,26 | 0,66 ±0,20 | 0,33 ±0,08 |
| Después de labranza | NT | IT | 0,98 ±0,15 | 0,62 ±0,13 | 0,47 ±0,09 | 0,30 ±0,03 |
| | | OT | 1,32 ±0,32 | 0,98 ±0,27 | 0,56 ±0,12 | 0,49 ±0,12 |
| | CT | IT | 1,73 ±0,17 | 1,22 ±0,18 | 0,92 ±0,16 | 0,49 ±0,08 |
| | | OT | 1,60 ±0,15 | 0,88 ±0,16 | 0,62 ±0,08 | 0,33 ±0,09 |
| Después de siembra | NT | IT | 0,44 ±0,04 | 0,34 ±0,01 | 0,24 ±0,03 | 0,11 ±0,04 |
| | | OT | 0,88 ±0,16 | 0,78 ±0,03 | 0,44 ±0,05 | 0,24 ±0,05 |
| | CT | IT | 0,77 ±0,16 | 0,49 ±0,15 | 0,49 ±0,14 | 0,34 ±0,09 |
| | | OT | 0,74 ±0,11 | 0,54 ±0,08 | 0,34 ±0,01 | 0,32 ±0,05 |

Apéndice 1 (Continuación)

| | | | Tensión (kPa) | | | |
|----------------------------|-----------|-----------|---------------|------------|------------|------------|
| | | | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,6 |
| Primer nudo | NT | IT | 1,05 ±0,38 | 0,75 ±0,26 | 0,49 ±0,02 | 0,27 ±0,10 |
| | | OT | 0,60 ±0,33 | 0,38 ±0,21 | 0,33 ±0,12 | 0,15 ±0,06 |
| | CT | IT | 1,57 ±0,41 | 0,96 ±0,23 | 0,60 ±0,18 | 0,27 ±0,09 |
| | | OT | 1,78 ±0,33 | 1,18 ±0,20 | 0,66 ±0,15 | 0,29 ±0,10 |
| Espigadura | NT | IT | 1,94 ±0,16 | 1,26 ±0,21 | 0,81 ±0,12 | 0,30 ±0,08 |
| | | OT | 2,30 ±0,24 | 1,13 ±0,20 | 0,70 ±0,22 | 0,12 ±0,06 |
| | CT | IT | 2,39 ±0,43 | 1,81 ±0,09 | 0,99 ±0,36 | 0,47 ±0,04 |
| | | OT | 2,82 ±0,40 | 1,89 ±0,40 | 1,07 ±0,08 | 0,38 ±0,15 |
| Madurez Fisiológica | NT | IT | 1,62 ±0,33 | 1,36 ±0,20 | 1,02 ±0,15 | 0,54 ±0,03 |
| | | OT | 1,87 ±0,48 | 1,02 ±0,27 | 0,73 ±0,17 | 0,45 ±0,13 |
| | CT | IT | 1,29 ±0,35 | 1,15 ±0,34 | 0,67 ±0,15 | 0,30 ±0,08 |
| | | OT | 1,27 ±0,21 | 1,01 ±0,25 | 0,51 ±0,18 | 0,40 ±0,19 |