

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROPIEDADES FÍSICAS DE
SUELO BAJO Y FUERA DE LA HUELLA DEL TRACTOR EN DOS SISTEMAS
DE LABRANZA**

JAVIER ANTONIO CERDA CHÁVEZ

Santiago, Chile

2015

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROPIEDADES FÍSICAS DE
SUELO BAJO Y FUERA DE LA HUELLA DEL TRACTOR EN DOS SISTEMAS
DE LABRANZA**

**SPATIAL AND TEMPORAL VARIABILITY OF SOIL PHYSICAL
PROPERTIES UNDER AND OUT OF THE TRACTOR TRACK IN TWO
TILLAGE SYSTEMS**

JAVIER ANTONIO CERDA CHÁVEZ

Santiago, Chile

2015

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROPIEDADES FÍSICAS DE
SUELO BAJO Y FUERA DE LA HUELLA DEL TRACTOR EN DOS SISTEMAS
DE LABRANZA**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniero Agrónomo.

JAVIER ANTONIO CERDA CHÁVEZ

	Calificaciones
Profesores Guías	
Paola Silva C. Ing. Agrónomo, Dr.	6,5
Oscar Seguel S. Ing. Agrónomo, Dr.	6,7
Profesores evaluadores	
Ian Homer B. Ing. Agrónomo, Dr.	6,5
Alfredo Olivares E. Ing. Agrónomo, Mg Sc.	6,0

Santiago, Chile

2015

Agradecimientos

*“No te dejes abatir por las despedidas.
Son indispensables como preparación para el reencuentro.
Y es seguro que los amigos se reencontrarán
después de algunos momentos o de todo un ciclo vital.”*

A la vida por darme la oportunidad de disfrutar la brisa de un nuevo día junto al sol de la mañana. A la muerte por aconsejarnos día a día y recordarnos que lo único real es este momento.

A mis queridos padres: Guillermo y Julia, que me mostraron este camino y me dieron las mejores herramientas para poder recorrerlo. Gracias por acompañarme en la alegría y en la tristeza; por festejar mis triunfos y aconsejarme en mis derrotas.

A la familia que me acompañó desde siempre y se preocupó de que me encontrara bien en este proceso otorgándome su apoyo incondicional. A mi tata Jaime; a mi lela; a mi tía Cristi (querida madrina); a mi tío Esteban; a mi querida hermana Mariana; a mi luminosa sobrina Amanda; a mi siempre sonriente Carolina; a mi dulces primos: “Estebitan”, Renzo y Rafael. También al Orlando “nomas” y la tía Vero que los quiero mucho.

A mi amada esposa y compañera de vida Javiera, quien comparte conmigo su fuerza; por estar junto a mí todos estos años acompañándome en las buenas y en las malas; por apoyarme en cada paso que he dado. Gracias por tu amor, gracias por tu arte, gracias por ser la mejor mujer del mundo.

A mi amada hija Julieta Libertad, que me da fuerzas para mantener mi fé en la humanidad. Por tus abrazos, tus besos y cada palabra que sale de tu boca.

A todos los profesores y funcionarios de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile. Especialmente a mis profesores guías por su paciencia y acompañarme en el camino de no dejar de aprender que significó esta memoria de título. Gracias Oscar, gracias Paola. También a don Hugo que “lo hace” por amor a dios y a su familia.

A la naturaleza por cautivarme y a la ciencia por ayudarme a explicar este extraño mundo en el que vivimos.

A los cabros. Wenso, gato, pitillo y Mao; esto no hubiera sido tan divertido sin ustedes.

Al pueblo mapuche por su inspirador ejemplo de lucha.

Especialmente a mi padre Guillermo Javier Cerda Preller, que me acompaña de una manera no física el de hoy y fue el responsable directo de muchas cosas que hoy me definen como persona. Gracias por el respeto y la tolerancia papito.

ÍNDICE

RESUMEN	1
Palabras clave	1
ABSTRACT	2
<i>Key words</i>	2
INTRODUCCIÓN	3
MATERIALES Y MÉTODOS	5
Lugar del estudio	5
Metodología	5
Propiedades del suelo evaluadas	6
Análisis estadístico	8
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
Propiedades medidas en el inicio y el final del ensayo	9
Textura	9
Materia orgánica	10
Densidad real	11
Caracterización del sistema poroso	12
Densidad aparente.....	12
Porosidad total	13
Distribución de tamaño de poros	16
Poros de drenaje rápido.....	16
Poros de drenaje lento.....	18
Poros de agua útil.....	20
Condición estructural del suelo	22
Estabilidad de microagregados	22
Estabilidad de macroagregados.....	24
Resistencia a la penetración	26
CONCLUSIONES	28
BIBLIOGRAFÍA	29
APÉNDICES	33

RESUMEN

Se caracterizó la dinámica de las propiedades físicas del suelo durante la temporada de un cultivo de trigo establecido en un Entic Haploxeroll manejado bajo sistemas de labranza cero (NT) y tradicional (CT). Para esto se realizaron muestreos de suelo a profundidades de 0-5, 5-15 y 15-30 cm en cuatro momentos relevantes del cultivo (previo y posterior a la siembra, primer nudo y espigadura) y en dos ubicaciones: bajo y fuera de la huella de tránsito de maquinaria, evaluándose propiedades físicas (densidad aparente, resistencia a la penetración, distribución de tamaño de poros, estabilidad de agregados). La densidad aparente bajo el sistema NT no presentó diferencias con CT entre los 0- 5 cm, sin embargo NT bajo huella presentó una baja variación en la temporada, no así el resto de las situaciones, que poseen un re-ordenamiento de partículas con incremento de la densidad aparente. Esto provocó una mayor resistencia a la penetración en NT, aunque las diferencias con CT desaparecieron en el muestreo de primer nudo. En CT hubo mayor cantidad de poros gruesos, incluso bajo la huella del tractor; sin embargo, los poros gruesos aumentaron en NT hacia primer nudo, igualando a los valores de CT. Los poros de agua útil no tuvieron diferencias entre sistemas de labranza ni bajo o fuera de la huella del tractor. Considerando la dinámica de estructuración que se interrumpe año a año con la labranza, CT presentó una menor estabilidad de macroagregados respecto a NT en superficie, sin encontrarse diferencias respecto a la huella en ambos sistemas de labranza; por último, la estabilidad de microagregados fue mejor en NT en todo el rango de profundidades hasta después de siembra.

Palabras clave: Propiedades físicas del suelo, estabilidad de agregados, labranza, huella.

ABSTRACT

The dynamics of soil physical properties were characterized during the season of a wheat crop established in an Entic Haploxeroll managed under conventional tillage (CT) and no-tillage (NT) systems. In order to characterize the temporal and spatial variability, soil samples were taken at depths of 0-5, 5-15 and 15-30 cm in four important moments of the crop (pre- and post-sowing, first knot and heading) and in two locations: in and out of the wheel track of the machinery, evaluating physical properties (bulk density, penetration resistance, pore size distribution, stability of aggregates). The bulk density under the NT system did not differ with respect CT between 0- 5 cm, however NT under wheel track had low variation in bulk density during the season, not the other situations, which shown a re-arrangement of particles with increased bulk density. This caused a greater resistance to penetration in NT, although differences with CT disappeared in the third sampling. In CT there was a greater amount of coarse pores, even under the wheel track of the tractor; however, the coarse pores increased in NT during the season, reaching the CT values. The pores of useful water did not show differences between tillage systems or position of wheel track. Considering that tillage destroy aggregates each year, CT showed a lower stability of macroaggregates respect to NT in surface, but no differences for wheel track position in both tillage systems were found. Finally, the stability was better in NT microaggregates in all depths compared to CT until sowing.

Keywords: Soil physical properties, aggregate stability, tillage, wheel track.

INTRODUCCIÓN

Una de las consecuencias negativas más importantes de la producción agrícola moderna es, probablemente, la degradación física del suelo por labores asociadas al exceso de labranza y al tránsito de maquinaria, que provoca compactación y erosión atribuible a la pérdida de la calidad estructural (Esteve et al., 2004; Bronick y Lal, 2005; Hamza y Anderson, 2005). Se entiende la compactación como una pérdida de volumen que tiene una masa de suelo por la aplicación de una fuerza externa y que es favorecida por características propias de este (Horn et al., 1993).

En la agricultura, el mayor efecto sobre las propiedades físicas del suelo es por el tráfico vehicular, siendo un componente esencial el sistema de manejo del suelo (Lipiec, 2004). La compactación producida por tránsito excesivo se traduce en un menor crecimiento de la parte radical y aérea de las plantas, por lo que finalmente es necesario realizar esfuerzos extras, con un mayor impacto económico, para mantener la producción (Eradat Oskoui et al., 1994). Es por esto que los sistemas de agricultura que promueven el reciclaje de la materia orgánica (MO) y/o están orientados a la conservación de suelos, son cada vez más recomendados en la agricultura nacional y mundial (FAO, 2001). Entre ellos, destaca la cero labranza, que no contempla la disrupción del suelo, presentando ventajas comparativas en relación a la labranza convencional por una mejor conservación de la estructura del suelo (Faiguenbaum, 2003; Acevedo y Silva, 2003).

La labranza convencional contempla la inversión y mezcla del suelo en profundidad, con un elevado número de pasadas de maquinaria, lo que genera una alta variabilidad espacial (Lipiec, 2004) con pérdida de la porosidad e incremento de la resistencia mecánica bajo la zona de tránsito (Ellies, 1999). Por su parte, en la agricultura de cero labranza, el suelo no es invertido ni mezclado con los residuos del cultivo, lo que resulta en un menor número de pasadas de maquinaria; esto parece tener un profundo impacto en muchas propiedades del suelo, principalmente en los primeros centímetros de éste (D'Haene et al., 2008). Sin embargo, se requiere del uso de sembradoras de una alta masa, por lo que, dependiendo de las condiciones del suelo al momento de la siembra, se puede generar compactación superficial (Martínez et al., 2008a). Además se ha observado que luego de varios años de cero labranza continua, los rendimientos tienden a disminuir, probablemente como resultado de la combinación de muerte de raíces, compactación del suelo en superficie y la alta carga del eje en la maquinaria de siembra directa (Botta et al., 2008).

Existe un dinamismo de las propiedades físicas del suelo que no varían sólo año a año, sino dentro de una temporada. Rudolffi (2008) realizó mediciones de estabilidad de agregados en sistemas de cero labranza y labranza tradicional, determinando una disminución de la estabilidad en la época invernal. Martínez et al. (2008a) encontraron interacción entre el sistema de labranza y la profundidad de muestreo para estabilidad de agregados, la densidad aparente y el contenido promedio de agua del suelo en el periodo de crecimiento de trigo, existiendo un aumento en la densidad aparente y la estabilidad de agregados en los

primeros centímetros en cero labranza. En general los estudios previos se basaron en mediciones realizadas en momentos discretos, faltando mayor detalle relacionado a otras propiedades físicas y a la relación con las labores involucradas o el estado fenológico del cultivo.

Six et al. (1999) determinaron que los sistemas de labranza que promueven el incremento de la MO del suelo favorecen la estabilidad temporal de las propiedades físicas, lo que fue corroborado por Dörner et al. (2009), quienes midieron una menor variación temporal en el volumen de suelos que poseen una baja intervención antrópica, lo que promovería la menor variabilidad de propiedades como la densidad aparente y la capacidad de flujo de agua.

En definitiva, el mayor dinamismo y cantidad de labores involucradas en la labranza convencional, estarían generando una mayor variabilidad espacial y temporal de las propiedades físicas relacionadas a porosidad y resistencia mecánica en relación a la labranza cero.

Este estudio tuvo por objetivo cuantificar la variabilidad espacial y temporal de algunas propiedades físicas del suelo que se genera dentro y fuera de la huella del tractor en sistemas de labranza convencional y cero labranza en un Haploxeroll durante una temporada de cultivo de trigo.

MATERIALES Y MÉTODO

Lugar del estudio

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Antumapu, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°40'Sur; 70°38'Oeste) durante el año 2012. La estación cuenta con un sitio de estudio de sistemas de labranza dependiente del Laboratorio de Relación Suelo Agua Planta, en tanto los análisis de suelo se realizaron en el laboratorio de Física de Suelos.

El tipo de clima es templado mediterráneo semiárido. El régimen térmico se caracteriza por temperaturas que varían en promedio, entre una máxima media de Enero de 28,2 °C y una mínima media de Julio de 4,4 °C. El periodo libre de heladas es de 231 días, con un promedio de 11 heladas por año. Registra anualmente 1621 días-grados y 1147 horas frío. El régimen hídrico tiene una precipitación media anual de 369,5 mm, un déficit hídrico de 997 mm y un periodo seco de 8 meses (Novoa et al., 1989).

El suelo en estudio es de origen aluvial y pertenece a la Serie Santiago (CIREN, 1996) desarrollado a partir de los sedimentos del cono aluvial del río Maipo. Esta Serie de suelos es miembro de la Familia Franca gruesa sobre arenosa, esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls. Presenta una topografía plana, con una pendiente de 1%, una profundidad media de 0,6 m, clase textural predominantemente franco arenosa y buen drenaje.

El sector de investigación cuenta con sitios en que durante 16 años se ha practicado manejos con labranza convencional (CT, por el acrónimo en inglés Conventional Tillage) y cero labranza (NT, por el acrónimo en inglés No Tillage). Los ensayos se realizaron en un monocultivo de trigo candeal en condición de secano.

Metodología

Existen dos sectores separados físicamente en unidades de manejo de 2 ha aproximadamente, correspondiendo a sistemas de labranza cero y convencional. Para cada uno, se individualizaron cuatro parcelas al azar (cuatro repeticiones) de 5 m de ancho por 10 m de largo, estableciendo dos tratamientos:

- T1: Bajo la huella del tractor (IT, por el acrónimo en inglés in track).
- T2: Fuera de la huella del tractor (OT, por el acrónimo en inglés out track).

Referidos a la huella dejada durante la siembra al transitar el tractor sobre la cama de semillas.

Los sistemas de labranza constituyeron dos ensayos diferentes. El diseño del experimento es de bloques completos con 4 repeticiones. La unidad experimental corresponde a la superficie definida por el ancho de la huella del tractor y el largo de la parcela, para el caso del tratamiento T1, mientras que para el tratamiento T2 corresponde a una superficie paralela y de iguales dimensiones a la del T1, separada a 0,4 m hacia la entre huella.

Al momento de sembrar, se marcó con estacas la zona de tránsito del tractor, de manera de hacer un seguimiento en el tiempo de las propiedades físicas relevantes por su carácter dinámico. Si bien es cierto que previo a la siembra no es posible delimitar los tratamientos (bajo y fuera de la huella de la maquinaria) se realizó un muestreo previo a la siembra como punto de partida control para el resto de las mediciones. El muestreo se realizó en la hilera de siembra a profundidades de 0-5, 5-15 y 15-30 cm en momentos relevantes de la temporada:

- Previo a siembra.
- Posterior a la siembra.
- Primer nudo.
- Espigadura.

Propiedades del suelo evaluadas

En laboratorio se midió, en muestras tamizadas a 2mm, la densidad real (D_r) mediante el método del picnómetro (Flint y Flint, 2002), la textura mediante el método del hidrómetro de Bouyoucos (Gee y Or, 2002) y el contenido de materia orgánica por calcinación (Nelson y Sommers, 1982). Estas evaluaciones se realizaron sólo en la primera y la última fecha, para cada profundidad y unidad experimental (4 repeticiones x 2 tratamientos x 2 sistemas de labranza x 3 profundidades). Además, para materia orgánica se calculó la razón de estratificación (RE) de acuerdo a Franzluebbers (2002), quien plantea que la razón de estratificación calculada como carbono orgánico superficial / carbono orgánico en profundidad, es un buen índice de calidad de suelos, destacando que sistemas de labranza que promueven el almacenamiento de carbono, como la cero labranza, alcanzan valores de estratificación cercanos a 3, siendo menor a 2 en sistemas de labranza convencional.

En cada uno de los momentos relevantes de la temporada, se evaluó: densidad aparente, espacio poroso, distribución de tamaño de poros, estabilidad de micro y macro agregados y resistencia a la penetración, una muestra por profundidad y unidad experimental.

El contenido de agua se midió con muestra gravimétrica y secado en estufa a 105°C. Para cuantificar el sistema poroso, se midió en laboratorio la densidad aparente (D_a) mediante el método del cilindro (Grossman y Reinsch, 2002); se calculó el espacio poroso (S) por la relación de la D_a y la D_r ($S = 1 - [D_a/D_r]$), considerando la primera medición de D_r (antes de siembra) común para las dos primeras fechas y la segunda evaluación (espigadura)

común para las dos últimas fechas, ya que la D_r es una propiedad muy poco variable en el tiempo (Warrick, 2002). También se midió la retención de agua (Dane y Hopmans, 2002) en muestras inalteradas tomadas en cilindros de 5,9 cm de diámetro y 5 cm de altura; para 0, 6 y 30 kPa de tensión se usaron cama de arena y olla de presión, en tanto con muestras disturbadas se midió la retención de agua a -1500 kPa en plato de presión, llevando los valores de contenido de agua gravimétrico (P_w) a volumétrico (P_v) mediante la relación $P_v = P_w \cdot D_a$. Finalmente se derivó la distribución de tamaño de poros a partir de la curva característica de retención de agua, según criterio de Paggliai y Vignozzi (2002), clasificándolos en poros de drenaje rápido (PDR, $>50 \mu\text{m}$), aquéllos que se desaturan entre los 0 a -6 kPa, poros de drenaje lento (PDL, 10- 50 μm), aquéllos que se desaturan en el rango de -6 a -33 kPa y poros de agua útil (PAU, 0,2- 10 μm), desaturándose en el rango de -33 a -1500 kPa.

La estabilidad de micro agregados se determinó mediante el método de la relación de dispersión (RD) (Berryman et al., 1982), que evalúa la estabilidad de agregados de entre 1 y 2 mm de diámetro realizando una dispersión suave en agua destilada, mientras que en una contramuestra se realizó una dispersión fuerte, agregando pirofosfato de sodio y agitación mecánica. El método se basa en la metodología del hidrómetro de Bouyocos (Gee y Or, 2002) relacionando la proporción de arcilla y limo determinados en la dispersión con agua en relación a la arcilla y limo presentes en la dispersión fuerte y presenta buena sensibilidad a los cambios de manejo (Seguel et al., 2003).

Para evaluar la condición de los macro agregados del suelo, se midió la estabilidad al agua mediante la variación del diámetro entre tamizado seco y tamizado húmedo (Hartge y Horn, 2009). La estabilidad de agregados al agua se midió tamizando en condición seca al aire, en un grupo de tamices de tamaños decrecientes (19,0; 14,7; 9,8; 6,8; 4,8; 3,3 y 2,0mm), una muestra de suelo no disturbada de masa conocida. En cada uno de los tamices se determinó la masa de suelo presente después del tamizado y se calculó su proporción en base a la masa original corregida por su contenido de agua. Posteriormente se realizó un tamizaje con los mismos tamices sumergidos en agua, donde se determinó la masa de suelo seco a 105°C presente en cada fracción, calculando la fracción parcial en relación a la masa original. Con las curvas de fracciones acumuladas en seco y húmedo ponderados por el diámetro medio de cada fracción, se calculó la variación del diámetro medio de agregados (VDMA) al pasar del tamizado seco al tamizado sumergido en agua, en cuyo caso el menor valor denota la mayor estabilidad (Hartge y Horn, 2009).

Finalmente, se realizaron mediciones de resistencia a la penetración con un penetrómetro de punta cónica (Bradford, 1986), asegurando un contenido de agua a capacidad de campo (24 horas después de una lluvia). Para esto se utilizó un penetrómetro de punta cónica de 30° y 1cm², realizando mediciones en profundidad hasta llegar al sustrato pedregoso característico del suelo del sitio de estudio.

Análisis estadístico

Se probaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza de las variables medidas, previo a la realización de un ANDEVA. Las variables densidad real, densidad aparente, poros de drenaje rápido, poros de drenaje lento, poros de agua útil, relación de dispersión, variación del diámetro medio de agregados y resistencia a la penetración se sometieron a un ANDEVA en diseño anidado para comparar los tratamientos (dentro y fuera de la huella del tractor), los sistemas de labranza, profundidad y su interacción. Cuando existieron diferencias se realizó un test de rango múltiple (DGC) con un $p \leq 0,05$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Propiedades medidas en el inicio y el final del ensayo

Textura

El Cuadro 1 muestra la distribución en el perfil del promedio de los separados texturales, arena, limo y arcilla, en los sistemas de labranza estudiados según profundidad. El Apéndice 1 tiene el detalle de todas las mediciones, por tratamiento y época de muestreo.

Cuadro 1. Distribución de tamaño de partículas (%) en cero labranza (NT) y labranza convencional (CT). Valores promedio antes de siembra y en espigadura para los tratamientos dentro y fuera de la huella del tractor.

Labranza		Distribución de tamaño de partículas (%)		
		Profundidad (cm)		
		0- 5	5- 15	15- 30
Arena	NT	51,6	48,6	44,9
	CT	46,9	47,7	46,0
Limo	NT	26,3	26,9	28,4
	CT	31,0	29,0	30,7
Arcilla	NT	22,1	24,6	26,7
	CT	22,2	23,3	23,3

La distribución de tamaño de partículas es homogénea entre sistemas de labranza y profundidades, presentándose la clases texturales en el límite del franco arcilloso con el franco arcillo arenoso en las tres profundidades estudiadas. Además no se observó variación con la huella del tractor ni en el tiempo, por lo que se presentan valores promedio de antes de siembra y espigadura.

Materia orgánica

El Cuadro 2 muestra el contenido de materia orgánica y la razón de estratificación (RE) para las posiciones relativas a la huella del tractor, en los sistemas de labranza cero y convencional. Se encontraron diferencias significativas entre sistemas de labranza, sin encontrarse diferencias entre posición relativa a la huella del tractor ni interacción. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 2.

Cuadro 2. Contenido de materia orgánica (%) y razón de estratificación (RE) antes de siembra y en espigadura para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT); bajo la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT).

Fecha	Labranza	Huella	Materia orgánica (%)						RE
			Profundidad (cm)						
			0 - 5		5 - 15		15 - 30		
Antes de siembra	NT		4,34	a	3,12	b	2,07	b	2,1
	CT		2,56	b	2,07	b	2,45	b	1,04
Espigadura	NT	IT	5,81	a	3,75	b	4,24	b	1,37
		OT	5,68	a	5,07	b	3,12	b	1,82
	CT	IT	2,52	b	2,56	b	3,15	b	0,80
		OT	2,62	b	2,53	b	3,06	b	0,86

Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

Se observó antes de siembra un mayor contenido de materia orgánica en NT de 0- 5 cm respecto a CT. Estas diferencias se mantuvieron en espigadura. La ausencia de labranza permite la acumulación de residuos orgánicos en superficie en el sistema NT (Martínez et al., 2008a), favoreciendo la captura global de carbono en relación a sistemas de labranza en que se favorece su combustión (Acevedo, 2002). Sin embargo, en profundidad los valores se igualan a los del sistema CT.

En CT, durante espigadura se observa una tendencia de 15- 30 cm a presentar un mayor contenido de materia orgánica respecto a las mediciones superficiales; esto se debe a la labranza de inversión, la cual entierra residuos que se encontraban en la superficie del suelo. Este incremento en profundidad no fue evidente antes de siembra, ya que posiblemente los rastrojos no estaban lo suficientemente humificados, dado el corto tiempo desde su incorporación al suelo (Six et al., 2004).

Respecto a la RE (Cuadro 2), ésta se calculó como la razón entre la MO a los 15-30 cm y los 0-5 cm. Destaca que NT mantuvo valores altos durante la temporada, en tanto CT presentó valores cercanos o menores a 1, indicador de una baja calidad en el

funcionamiento ecosistémico del suelo (Franzluebbers et al., 2012).

Densidad real

El Cuadro 3 muestra la densidad real para las posiciones relativas a la huella del tractor, dentro (IT) y fuera (OT) de la huella de éste para los sistemas de labranza cero (NT) y convencional (CT) en las dos fechas de muestreo. Se observaron diferencias significativas entre sistemas de labranza en superficie antes de siembra. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 3.

Cuadro 3. Densidad real (Mg m^{-3}) antes de siembra y en espigadura para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT); bajo la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT).

Fecha	Labranza	Huella	Densidad real (Mg m^{-3})					
			Profundidad (cm)					
			0 - 5		5 - 15		15 - 30	
Antes de siembra	NT		2,51	b	2,59	a	2,61	a
	CT		2,70	a	2,64	a	2,64	a
Espigadura	NT	IT	2,47	a	2,67	a	2,57	a
		OT	2,57	a	2,61	a	2,65	a
	CT	IT	2,61	a	2,60	a	2,66	a
		OT	2,61	a	2,54	a	2,67	a

Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

La Dr es una propiedad muy estable, que depende de la mineralogía de las partículas sólidas: es así como los valores se encuentran dentro de los rangos esperados para suelos minerales (Sandoval et al., 2012). Los menores valores de Dr fueron observados en NT entre 0-5 cm, lo que podría estar relacionado al efecto de la acumulación de materia orgánica en superficie (Martínez et al., 2008b), lo que provoca un cambio en la proporción de partículas minerales y orgánicas que componen la fracción sólida del suelo, en favor de las partículas orgánicas, que son menos densas (Rühlmann et al., 2006).

Caracterización del sistema poroso

Densidad Aparente

El Cuadro 4 muestra los valores de densidad aparente (D_a) de los tratamientos en los dos sistemas de labranza y en las cuatro fechas. Se observaron diferencias significativas entre sistemas de labranza y profundidad antes de siembra, en primer nudo y en espigadura. Existieron diferencias significativas entre posición relativa a la huella del tractor en primer nudo de 5- 15 y 15- 30 cm. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 4.

Cuadro 4. Densidad aparente (Mg m^{-3}) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Densidad aparente (Mg m^{-3})					
			Profundidad (cm)					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		1,28	b	1,49	a	1,57	a
	CT		1,21	b	1,24	b	1,32	b
Después de siembra	NT	IT	1,29	a	1,50	a	1,49	a
		OT	1,45	a	1,51	a	1,36	a
	CT	IT	1,48	a	1,46	a	1,41	a
		OT	1,32	a	1,31	a	1,28	a
Primer nudo	NT	IT	1,25	b	1,33	b	1,39	b
		OT	1,41	b	1,50	a	1,45	a
	CT	IT	1,35	b	1,25	b	1,23	b
		OT	1,23	b	1,23	b	1,24	b
Espigadura	NT	IT	1,26	b	1,44	a	1,45	a
		OT	1,41	b	1,40	a	1,44	a
	CT	IT	1,31	b	1,38	b	1,39	b
		OT	1,21	b	1,31	b	1,24	b

Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

La D_a medida entre 0-5 cm de profundidad no presentó diferencias entre sistemas de labranza en ninguna fecha. Esto puede deberse a la alta estabilidad superficial del suelo, favorecida por la no interrupción por labranza; así, el paso de cargas mecánicas generaría un mayor encaje entre partículas en NT, pero con la ventaja de tener un mulch orgánico en

superficie que previene la compactación (Mulumba y Lal, 2008). Por su parte los valores de Da obtenidos de 5-15 y 15-30 cm fueron mayores en NT que en CT antes de siembra, primer nudo y en espigadura.

El mayor dinamismo temporal de esta propiedad se observó en CT, que tuvo un incremento de la Da después de siembra, igualando en las profundidades de 5- 15 y 15- 30 cm a la Da de NT en esta fecha. Posteriormente se produjo una disminución de esta propiedad, observándose diferencias con NT en primer nudo y espigadura. Entre 5-15 y 15-30 cm la Da manifestó una disminución respecto a la condición después de siembra, contrario a lo esperado, en que posterior a la labranza se produciría un incremento sostenido de la Da (Osunbitán et al., 2005). Esto se puede deber a una friabilización mecánica generada por los ciclos de humectación y secado, característico de suelos con más de 20% de arcilla (Semmel *et al.*, 1990) o por la acción de las raíces del cultivo, que se encuentran con un suelo de baja cohesión, con partículas fácilmente desplazables.

Los resultados obtenidos concuerdan con lo informado en el sitio de estudio por Martínez et al. (2008a) quienes no encontraron diferencias significativas entre sistemas de labranza en superficie. En el presente trabajo existió un efecto significativo de la labranza entre 5-15 y 15-30 cm antes de siembra, en primer nudo y espigadura, siendo más densa NT. Resultados contrastantes en el estudio de la densidad aparente son comunes y están relacionados mayormente con factores de manejo, como la sembradora (peso de la maquinaria, ancho o presión de los neumáticos), número de pasadas, el contenido de agua del suelo cuando es labrado (Botta et al., 2005) o la época del muestreo.

Porosidad total

En la Figura 1 se observa gráficamente la evolución de la porosidad total durante la temporada.

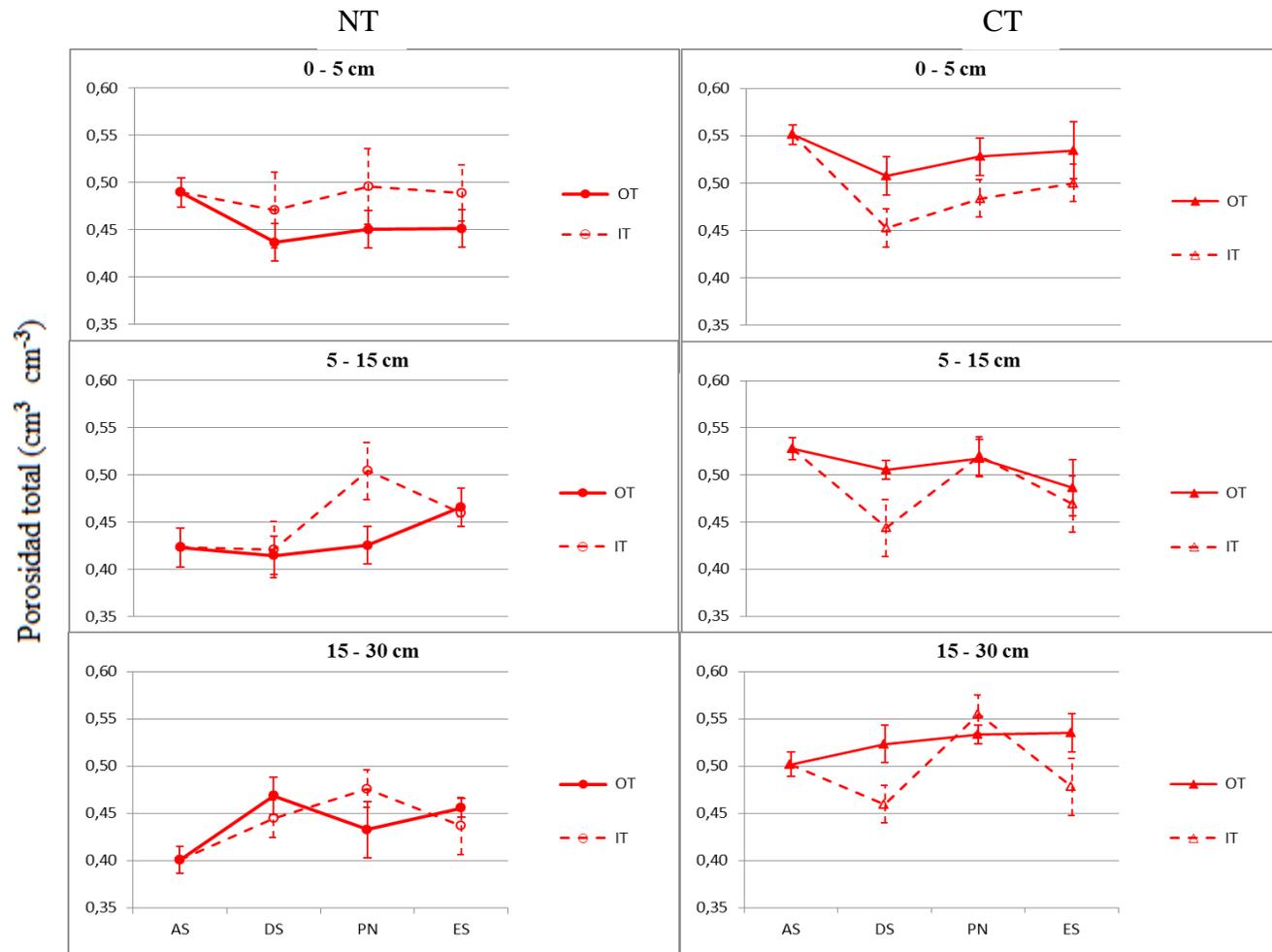


Figura 1. Porosidad (S) para cero labranza (NT, izquierda) y labranza convencional (CT, derecha), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades. Los momentos de medición corresponden a antes de siembra (AS), después de siembra (DS), primer nudo (PN) y espigadura (ES). Las barras corresponden al error estándar.

Se observa gráficamente el efecto de la huella del tractor (IT) sobre la porosidad en el momento posterior al tránsito de maquinaria en CT, con una disminución drástica después de la siembra (DS), especialmente hasta los 15 cm de profundidad, sin embargo la porosidad del suelo en CT IT tiende a recuperarse con el tiempo, posiblemente por el proceso de regeneración de estructura demostrado por Semmel *et al.* (1990) como consecuencia de los ciclos de humectación y secado, que fue corroborado por Seguel y Horn (2006) en sistemas de agregados homogéneos.

Por su parte, en NT no se generaron cambios en la porosidad total por efecto de la labor de siembra y en general los valores fueron estables en el tiempo. Solo entre los 5- 15 cm para la medición de primer nudo la condición IT presentó una notoria mayor porosidad que OT, aunque sin diferencias estadísticas significativas. El incremento creciente de porosidad entre 5- 15 cm entre los periodos de presiembra y primer nudo se puede deber a un proceso de friabilización natural señalado por Dexter (1988) para suelos sometidos a tránsito. Este fenómeno se repite con menor intensidad entre los 15- 30 cm y no se presenta en superficie (0- 5 cm), donde la estabilidad mecánica asegura una homogeneidad en el sistema poroso a lo largo del tiempo. En este sentido, Watts y Dexter (1998) plantean que inmediatamente bajo la huella de tránsito es donde se presenta la menor friabilización, pero que los horizontes profundos del suelo escapan al efecto negativo de las cargas superficiales.

Distribución de tamaño de poros

En los cuadros 5, 6 y 7 se presenta la distribución de tamaño de poros en el perfil en los sistemas de labranza estudiados según profundidad.

Poros de drenaje rápido. En el Cuadro 5 se muestran los resultados obtenidos para los poros de drenaje rápido (PDR, $>50 \mu\text{m}$). Se observaron diferencias significativas entre sistemas de labranza antes de siembra y en espigadura. Después de siembra y en primer nudo aparece un efecto de interacción con la posición relativa a la huella del tractor. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 5.

Cuadro 5. Poros de drenaje rápido ($>50 \mu\text{m}$) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Poros de drenaje rápido (%)					
			Profundidad (cm)					
			0-5	5-15	15-30			
Antes de siembra	NT		15,4	b	10,5	c	8,8	c
	CT		20,1	a	19,6	a	19,2	a
Después de siembra	NT	IT	13,1	c	13,0	c	14,6	c
		OT	13,0	c	15,1	c	18,5	b
	CT	IT	15,1	c	15,7	c	16,2	c
		OT	22,9	a	22,9	a	21,9	a
Primer nudo	NT	IT	17,9	b	19,0	b	16,2	b
		OT	12,5	c	16,7	b	15,6	b
	CT	IT	18,0	b	18,1	b	21,5	a
		OT	23,6	a	21,2	a	23,4	a
Espigadura	NT	IT	12,7	b	11,7	b	11,3	b
		OT	12,0	b	10,9	b	13,7	b
	CT	IT	16,0	a	19,1	a	15,1	a
		OT	17,8	a	16,6	a	17,5	a

Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

Antes de siembra, en NT se observó un mayor contenido de PDR entre 0-5 cm con respecto a 5-15 y 15-30 cm, debido posiblemente a que la estratificación de la materia orgánica determina un mayor contenido de PDR en superficie (Mulumba y Lal, 2008). El contenido

de PDR de CT fue mayor que el de NT en todas las profundidades, manteniéndose la condición fuera de la huella (OT) del sistema CT con los mayores niveles de PDR hasta la evaluación de primer nudo.

Después de siembra y en primer nudo, CT tuvo una mayor cantidad de PDR que NT fuera de la huella del tractor (OT) en el rango de profundidad de 0- 30 cm, en cambio bajo la huella del tractor (IT) los PDR de CT se redujeron hasta igualarse con NT. La diferencia entre posición relativa a la huella del tractor que fue observada en CT después de siembra y en primer nudo desapareció en espigadura, evidenciando una disminución de la macroporosidad en CT OT, posiblemente por un proceso de asentamiento por secado. (Horn et al., 2007).

Aun cuando las rotaciones de cultivo buscan mantener la calidad física del suelo, Ellies et al. (2000) encontraron que la labranza del suelo es la que genera la mayor pérdida de macroporos en relación a manejos que intervienen menos el suelo. Por otra parte, en relación a los sistemas de labranza, Reynolds et al. (2002) determinaron que en suelos con dominancia de arenas o de arcillas la macroporosidad es mayor en NT que en CT, en cambio en suelos francos no se observa esta diferencia o incluso la macroporosidad de CT es mayor a la de NT. De todas formas, el valor mínimo de 8% de poros gruesos planteado por Horn y Fleige (2009) es superado por todas las condiciones analizadas en este estudio, por ende no existen restricciones para la producción de cultivos.

Poros de drenaje lento. En el Cuadro 6 se muestran los resultados obtenidos para los poros de drenaje lento (PDL, 10- 50µm). Se observaron diferencias significativas entre sistemas de labranza y profundidad antes de siembra y en primer nudo, sin encontrarse diferencias significativas en espigadura. Aparece un efecto de interacción entre labranza y la posición relativa a la huella del tractor después de siembra. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 6.

Cuadro 6. Poros de drenaje lento (10- 50µm) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Poros de drenaje lento (%)					
			Profundidad (cm)					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		5,2	b	7,2	a	5,1	b
	CT		9,0	a	8,1	a	7,5	a
Después de siembra	NT	IT	4,8	c	4,3	c	4,6	c
		OT	4,8	c	5,4	b	5,8	b
	CT	IT	7,3	a	6,5	b	6,5	b
		OT	7,5	a	7,7	a	7,7	a
Primer nudo	NT	IT	3,1	b	3,8	b	4,6	b
		OT	3,4	b	4,8	b	4,9	b
	CT	IT	6,0	a	7,1	a	6,2	a
		OT	6,1	a	6,7	a	6,5	a
Espigadura	NT	IT	6,3	a	5,8	a	6,9	a
		OT	5,9	a	6,4	a	6,8	a
	CT	IT	5,2	a	7,0	a	6,2	a
		OT	6,2	a	5,4	a	6,1	a

Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

En general se registró un mayor contenido de poros de drenaje lento (PDL) en el sistema de labranza convencional (CT) en todas las profundidades, existiendo un efecto del tratamiento (IT y OT) solo en la medición después de siembra. Estas diferencias desaparecieron a medida que avanzó la temporada, terminando todas las situaciones en el rango de 5 a 7% de PDL.

Antes de siembra, NT presentó un menor contenido de PDL que CT, excepto entre 5-15

cm, en que el contenido de PDL no presentó diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de labranza. Después de siembra en NT se observaron los menores contenidos de PDL bajo la huella del tractor (IT) entre los 5-30 cm, sin encontrarse diferencias entre los 0-5 cm con la posición OT. Por su parte, NT OT entre 5-30 cm tuvo un mayor contenido de PDL y no presentaron diferencias con lo registrado en CT IT. La condición CT OT presentó los mayores valores de PDL en esta fecha. En primer nudo existió un mayor contenido de PDL en CT que en NT, presentando diferencias significativas entre sistemas de labranza. Las diferencias entre sistemas de labranza observadas en primer nudo no se repitieron en espigadura.

El sistema CT, entre los 0-5 cm de profundidad, tuvo una pérdida gradual de los poros de drenaje lento, lo que podría deberse a procesos de dispersión por una baja estabilidad al agua ante eventos de precipitación, los cuales dispersan y movilizan partículas, taponeando poros o reduciendo su diámetro equivalente, especialmente cuando la preparación de la cama de semillas es excesiva y deja un suelo muy mullido (Lado *et al.*, 2004).

Si bien los PDL mostraron una buena sensibilidad a las distintas condiciones de uso y manejo, con diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos, sistemas de labranza y profundidades, en general se mantuvieron en valores inferiores al 8% a partir de la siembra, lo que en términos prácticos, de acuerdo a Seguel *et al.* (2011) resulta en una baja influencia de este tipo de poros sobre la funcionalidad física del suelo.

Poros de agua útil. En el Cuadro 7 se muestran los resultados obtenidos para los poros de agua útil (PAU, 0,2- 10 μm), observándose diferencias significativas entre sistemas de labranza y profundidad después de siembra e interacción entre sistemas de labranza y posición relativa a la huella del tractor en espigadura. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 7.

Cuadro 7. Poros de agua útil (0,2- 10 μm) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Poros de agua útil (%)					
			Profundidad (cm)					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		13,0	a	12,3	a	11,8	a
	CT		10,8	a	12,8	a	13,0	a
Después de siembra	NT	IT	18,3	a	12,8	b	12,7	c
		OT	19,1	a	14,9	b	10,7	c
	CT	IT	13,3	c	11,1	c	11,8	c
		OT	11,3	c	11,1	c	12,0	c
Primer nudo	NT	IT	18,8	a	14,1	a	14,4	a
		OT	18,2	a	13,8	a	15,0	a
	CT	IT	14,5	a	16,3	a	15,9	a
		OT	15,3	a	15,0	a	15,1	a
Espigadura	NT	IT	16,0	a	13,6	b	13,9	b
		OT	15,3	a	16,4	a	15,0	a
	CT	IT	15,9	a	15,2	a	14,4	b
		OT	13,0	b	14,0	b	14,3	b

Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

Antes de siembra los sistemas de labranza presentaron una condición similar, sin diferencias en el contenido de poros de agua útil (PAU). Valores de PAU entre 15 y 20% (base volumen) son considerados óptimos para un enraizamiento adecuado en la mayoría de los suelos, en tanto valores entre 10 y 15% son considerados limitados (Warrick, 2002; Reynolds et al., 2009). En este sentido, el sistema NT aseguró al menos en superficie una mejor condición para el cultivo a lo largo de la temporada.

Se observó un mayor contenido de poros de agua útil en los 5 cm superficiales en el sistema

de cero labranza, presentando diferencias significativas después de siembra, en que los PAU en NT aumentaron por efecto de la microescarificación producida por la sembradora de cero labranza, la cual suelta ligeramente las partículas del suelo sin un incremento evidente en la porosidad total. Por su parte, la labranza convencional invierte y rotura el suelo, alterando la porosidad total de éste, especialmente los poros de drenaje rápido, que parecen ser más sensibles al paso de la rueda del tractor (Horn et al., 2003).

En general, la contribución de materia orgánica aportada como mulch genera incrementos en el agua aprovechable de los suelos (Mulumba y Lal, 2008), tendencia que se observó en NT respecto a CT y que ya habría sido reportada por Reynolds *et al.* (2002) para una amplia gama de tipos de suelo. Aun así el proceso de siembra en CT solo provocó cambios en los poros más gruesos del suelo (Cuadro 5), sin alterar los PDL y PAU (Cuadros 6 y 7).

Condición estructural del suelo

Estabilidad de microagregados

El Cuadro 8 presenta los resultados de la Relación de Dispersión (RD) evaluada en agregados de 1 a 2 mm, donde el menor valor denota la mayor estabilidad. Se observaron diferencias significativas entre sistemas de labranza antes y después de siembra. No fueron observadas diferencias de RD con respecto a la posición relativa a la huella del tractor en ninguna fecha ni profundidad. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 8.

Cuadro 8. Relación de dispersión (%) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Relación de Dispersión (%)					
			Profundidad (cm)					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		47,6	b	47,8	b	53,3	b
	CT		60,4	a	65,9	a	54,6	b
Después de siembra	NT	IT	52,9	b	44,8	b	50,2	b
		OT	53,0	b	54,8	b	51,0	b
	CT	IT	61,1	a	63,0	a	62,0	a
		OT	62,1	a	64,1	a	68,8	a
Primer nudo	NT	IT	42,2	a	44,4	a	42,6	a
		OT	40,4	a	49,0	a	46,8	a
	CT	IT	54,7	a	49,8	a	52,3	a
		OT	56,9	a	44,1	a	50,1	a
Espigadura	NT	IT	47,3	a	49,6	a	50,4	a
		OT	43,9	a	51,6	a	46,7	a
	CT	IT	49,1	a	45,7	a	51,3	a
		OT	49,5	a	54,6	a	56,9	a

Letras distintas implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

Antes de siembra, NT presentó una mayor estabilidad de microagregados que CT de 0 a 15 cm, en respuesta a un mayor contenido de materia orgánica (Cuadro 2). Después de siembra se observó una mayor estabilidad de microagregados en NT en todas las profundidades. Por

su parte, si bien CT genera la continua destrucción de los agregados por la labranza, a la vez favorece la generación de agentes cementantes producto de la descomposición de la materia orgánica (Six et al., 2004), aumentando durante la temporada la estabilidad de microagregados, tanto así que en primer nudo y espigadura no se observaron diferencias entre sistemas de labranza. Seguel et al. (2003) propone que la estabilidad de microagregados se ve favorecida por la adición de MO, sin embargo Tisdall y Oades (1982) señalan que, dependiendo del grado de descomposición del residuo, el efecto estabilizante de las partículas se produce sobre distintos tamaños de agregados. Abiven y Chenu (2009) señalan que el efecto de la descomposición del rastrojo de trigo sobre la estabilidad de los agregados se produce aproximadamente a los tres meses de incorporado al suelo, dándole sentido a la mejora en la estabilidad de los microagregados con el tiempo en CT.

De acuerdo a Berryman et al. (1982), todos los casos referidos en esta memoria califican como inestables ($RD > 30\%$); sin embargo, la prueba de estabilidad de microagregados presenta sensibilidad a los manejos en suelos con altos contenidos de arcilla (Aravena, 2015) o con aplicaciones elevadas de materia orgánica (Seguel et al., 2003)

Estabilidad de Macroagregados

La prueba de estabilidad de macroagregados (2- 30 mm), al igual que la prueba de estabilidad de microagregados, considera la dispersión de los agregados por efecto del agua, de manera que menor valor de VDMA indica una mayor estabilidad. Los resultados se presentan en el Cuadro 9, observándose diferencias significativas entre sistemas de labranza en todas las fechas evaluadas y encontrándose una interacción con la posición relativa a la huella del tractor después de siembra. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 9.

Cuadro 9. Variación de diámetro medio de agregados (VDMA) (mm) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Variación del diámetro medio de agregados (mm)					
			Profundidad					
			0-5	5- 15	15-30			
Antes de siembra	NT		1,41	c	4,52	b	5,59	a
	CT		4,01	b	3,00	b	3,71	b
Después de siembra	NT	IT	2,54	c	2,48	c	5,62	b
		OT	1,53	c	4,03	b	5,62	b
	CT	IT	4,42	b	6,83	b	4,96	b
		OT	6,12	b	5,33	b	8,75	a
Primer nudo	NT	IT	3,44	b	7,71	a	8,86	a
		OT	2,40	b	6,74	a	8,52	a
	CT	IT	6,55	a	6,46	a	5,05	a
		OT	10,23	a	8,84	a	7,15	a
Espigadura	NT	IT	2,28	b	3,66	b	5,22	a
		OT	2,06	b	4,44	b	5,08	a
	CT	IT	6,30	a	5,92	a	4,55	a
		OT	6,65	a	9,12	a	7,04	a

Letras distintas en sentido vertical implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

Antes de siembra, la mayor estabilidad de macroagregados se presenta en el sistema de labranza NT de 0- 5 cm (menores valores de VDMA); sin embargo se observó una disminución en profundidad del VDMA en CT, alcanzando valores similares a los de NT

entre 5-15 cm y significativamente menores entre los 15-30 cm.

La labranza del suelo genera una disrupción física de los macroagregados, alterando así su ciclo de formación, aumentando la pérdida de fracciones lábiles dentro de ellos (Six *et al.*, 1999; Oorts *et al.*, 2007) y reduciendo su estabilidad, en función del contenido de materia orgánica del suelo (Eiza *et al.*, 2006). El hecho que el sistema CT haya presentado una mayor estabilidad (menor VDMA) que NT entre los 15-30 cm en la evaluación antes de siembra, responde a la incorporación en profundidad de la materia orgánica por efecto de la inversión del suelo. El máximo efecto de la descomposición del rastrojo de trigo sobre la estabilidad de los agregados se produce aproximadamente a los tres meses de incorporado al suelo (Abiven y Chenu., 2009), por lo que las diferencias detectadas antes de siembra corresponden a un efecto residual de la temporada anterior.

Después de siembra se observó una mayor estabilidad de agregados en NT de 0-5 cm, entre los 5-15 cm, NT presentó mayor estabilidad en IT y valores iguales con relación a la huella del tractor de CT entre 15-30 cm. Por su parte, CT no presentó diferencias respecto a la posición relativa a la huella del tractor entre 5-15 cm, sin embargo de 15-30 cm IT presentó mayor estabilidad. En primer nudo, las diferencias entre sistemas de labranza ocurren en los primeros 5 cm analizados, observándose una mayor estabilidad en NT.

Six *et al.* (2002) y Eiza *et al.* (2006) señalan que sistemas de labranza de conservación de suelos, como NT, muestran mayor estabilidad de agregados (menor VDMA) que sistemas que contemplan una alta disrupción del suelo, como CT. Una alta agregación y estabilidad cumplen un rol importante respecto a la funcionalidad física y la protección de la materia orgánica del suelo (Tisdall y Oades, 1982). Los agregados crean una barrera al acceso de microorganismos y previenen la degradación de la materia orgánica del suelo (Six *et al.*, 2002), resultando en que prácticas de manejo que reducen la disrupción del suelo e incrementan su cobertura y la entrada de C al sistema, como NT, contribuyen a la agregación y estabilización del suelo (Bronick y Lal, 2005; Eiza *et al.*, 2006). Las diferencias generadas entre los tratamientos (OT v/s IT).

Resistencia a la penetración

En el Cuadro 10 se muestran los resultados de resistencia a la penetración, donde se observó que existieron efectos múltiples (sistema de labranza, posición respecto a la huella e interacción) según la época de muestreo. Se presenta el detalle con el error estándar en el Apéndice 10.

Cuadro 10. Resistencia a la penetración (kPa) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Resistencia a la penetración (kPa)					
			Profundidad					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		2349	c	4017	b	4804	a
	CT		566	d	1072	d	1837	c
Después de siembra	NT	IT	978	c	3891	a	4879	a
		OT	1179	c	1272	c	2771	b
	CT	IT	679	c	1181	c	1182	c
		OT	243	c	831	c	2583	b
Primer nudo	NT	IT	1901	b	5558	a	6585	a
		OT	1061	b	5215	a	6348	a
	CT	IT	2775	b	5212	a	6348	a
		OT	2380	b	4096	a	4858	a
Espigadura	NT	IT	3581	b	6889	a	6587	a
		OT	2486	c	5941	a	6353	a
	CT	IT	2070	c	4060	b	5185	b
		OT	2043	c	3675	b	4465	b

Letras distintas en sentido vertical implican diferencias estadísticamente significativas dentro de la fecha ($p \leq 0,05$).

La resistencia a la penetración presentó un aumento en profundidad en los dos sistemas de labranza en todas las fechas registradas, como consecuencia de la masa sobre yacente de suelo (Veiga et al., 2007). Antes de siembra se observó una mayor resistencia a la penetración en NT que en CT, tal como observó Lampurlanés y Cantero-Martínez (2003), quienes reportaron mayor resistencia a la penetración bajo cero labranza comparado con otros sistemas de labranza; sin embargo, en el mismo sitio del presente estudio, Martínez et

al. (2008a), encontraron esta diferencias solo entre los primeros 15 cm, con valores de RP mayores en el sistema de cero labranza manejado durante 4 años.

Después de siembra no fueron observadas diferencias entre sistemas de labranza ni posición relativa a la huella del tractor en los primeros 5 cm, sin embargo entre los 5 y 30 cm NT IT presentó una mayor resistencia a la penetración que NT OT. Por su parte, CT presenta mayor resistencia a la penetración bajo la huella del tractor (OT) que fuera de ella (IT) entre los 15-30 cm de profundidad, sin presentarse diferencias entre posición relativa a la huella entre los 0-15 cm. Contrario a lo esperado, el sistema NT no presentó un comportamiento estable, mostrando una alta variabilidad espacial.

En primer nudo fue observada una mayor resistencia a la penetración entre los 5-30 cm con respecto a los 5 cm superficiales, sin diferencias entre sistemas de labranza. Finalmente, en espigadura, entre los 0-5 cm se observó mayor resistencia a la penetración en NT IT con respecto a NT OT. Entre los 5-30 cm NT presentó una mayor resistencia a la penetración que CT.

Niveles de resistencia a la penetración entre 200 y 500 kPa comienzan a tener restricción para el crecimiento de raíces, el cual se detiene totalmente con niveles de 2000 kPa evaluados con el contenido de agua del suelo a capacidad de campo (Taylor y Brar, 1991). En términos generales se observaron valores restrictivos para el crecimiento de raíces desde antes de la siembra en NT y desde primer nudo en CT. En el presente estudio no fue posible asegurar un contenido de agua a capacidad de campo al momento de realizar la prueba de resistencia a la penetración, dadas las condiciones de secano a las que estuvo sometido el cultivo. Este hecho pudo haber tenido una influencia importante en la variabilidad de los datos obtenidos dentro de la fecha, al no existir homogeneidad en el contenido de agua; así mismo no sería válido ver la evolución en el tiempo de la RP, dada la diferencia en el contenido de agua entre fechas.

En definitiva, tanto NT como CT presentan un alto dinamismo en sus propiedades físicas de suelo, tanto espacial como temporalmente, por lo que su caracterización necesariamente requiere contextualizar el momento y las condiciones de muestreo, poniendo especial énfasis en la variabilidad intrínseca de cada sistema de labranza.

CONCLUSIONES

Bajo las condiciones de este estudio:

El tránsito de maquinaria no afecta la variabilidad temporal de las propiedades físicas de suelo ni el contenido de materia orgánica durante la temporada de cultivo; sin embargo, la labranza es la que provoca mayores cambios en estas propiedades.

La densidad aparente se incrementa después de la siembra por un efecto de asentamiento natural de las partículas, sin efecto del factor huella de tránsito. Esto se traduce en una disminución de la porosidad total, la cual se recupera durante el transcurso de la temporada. A su vez, la mayor acumulación de materia orgánica en el sistema de cero labranza explicó la mayor estabilidad de agregados, aunque la ausencia de labranza promovió la mayor resistencia a la penetración

La huella de tránsito tuvo un efecto sobre los poros gruesos bajo el sistema CT, que disminuyeron significativamente bajo la huella del tractor por acción de la siembra. El resto de las propiedades tuvo una dinámica asociada a la regeneración estructural que ocurre en forma natural en el suelo.

BIBLIOGRAFÍA

- Abiven, S. and C. Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability - a literature analysis. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(1): 1-12.
- Acevedo, E. 2002. Sustentabilidad de los cultivos anuales: cero labranza, manejo de rastrojos. 184 p.
- Acevedo, E. y P. Silva. 2003. Agronomía de la Cero Labranza. Ciencias Agronómicas N° 10. 132 p.
- Aravena, A. 2015. Evaluación del efecto de manejos de poda y enmiendas al suelo sobre el potencial hídrico de los brotes de olivos (*Olea europaea* L.) sometidos a déficit hídrico absoluto en la Región de Coquimbo. Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. Santiago, Chile. 40 p.
- Berryman, C.; D. Davies; C. Evans; M. Harrod; A. Hughes; R. Skinner; R. Swain and D. Soane. 1982. Techniques for measuring soil physical properties. Formerly Advisory Paper N°18. Reference book 441. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Swedish. 116p.
- Botta, G.F., Jorajuria, D., Rosatto, H. and Ferrero, C., 2005. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil & Tillage Research*, 86: 9-14.
- Botta, G. F.; D. Rivero; O. Pozzolo; M. Tourn, F. Bellora-Melcon, G. Nardon; R.; et al. 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and bias-ply tyres in two soil conditions: conventional tillage and direct sowing. *Soil & Tillage Research*, 101: 44-51.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability. pp: 268-506. In: Klute, A.(ed.) Methods of soil analysis. Part 1: Physical and mineralogical methods. Second edition, ASA, SSSA, Madison, Wisconsin.
- Bronick, C.J. and R. Lal. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124: 3-22.
- CIREN. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripción de suelos materiales y símbolos. Publicación N°115. Santiago de Chile. 132 p.
- Dane, J. H. and J. W. Hopmans. 2002. Water retention and storage. pp: 717-720. In: Dane, J. H. y Topp, G. C. (Eds.). Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series N° 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
- D'Haene, K.; J Vermang.; W. M. Cornelis, B. L. Leroy.; W.Schiettecatte; S. De Neve; D. Gabriels and G. Hofman. 2008. Reduced tillage effects on physical properties of silt loam soils growing root crops. *Soil & Tillage Research*, 99: 279-290.
- Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil & Tillage Research*, 11: 199-238.
- 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 and Tillage Research*, 106: 45-53.
- Eiza, M. J., Studdert, G. A., Fioriti, N., Dominguez, G. F. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en molisoles de Balcarce. Proceedings 20th Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, September 19-22, 2006, Salta-Jujuy, Argentina, (in CD-ROM).

- Ellies, A. 1999. Cambios estructurales y distribución de tensiones en suelos sujetos al tránsito de maquinaria. *Bosque*, 20(1): 37- 45.
- Ellies A.; R. Horn and R. Smith. 2000. Effect of management of a volcanic ash soil on structural properties. *International Agrophysics*, 14(4): 377-384.
- Eradat Oskoui, K.; D. J. Campbell; B. D. Soane and M J. McGregor. 1994. Economics of modifying conventional vehicles and running gear of minimize soil compaction. In: B.D. Soane, y C. Van Ouwerkerk (eds.) Soil compaction in crop production. Elsevier, Amsterdam, The Netherland. 539-567.
- Esteve, J.F.; A. Imeson; R. Jarman; R. Barberis; B. Rydell; V. C. Sanche; et al. 2004. Pressures and drivers causing soil erosion. pp: 133-149. En: Van-Camp, L.; B. Bujarrabal; A. R. Gentile; R. J. Jones; L. Montanarella; C. Olazabal; et al. (eds.). Reports of the Technical Working Groups Established under the Thematic Strategy for Soil Protection, EUR 21319 EN/2, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Faiguenbaum, H. 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Editorial Ograma S.A., Santiago, Chile. 695 p.
- FAO. 2001. Labranza cero: cuando menos es más. Agricultura 21. Disponible en <http://www.fao.org/ag/esp/revista/0101sp1.htm>. Leido el 27 de diciembre del 2011.
- Flint, A. L. and L. E. Flint. 2002. The solid phase. Particle density. pp: 229-240. En: Dane, J. H. and Topp, G. C. (Eds.). Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series No 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
- Franzluebbers, A. J. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. *Soil & Tillage Research*, 66: 197-205.
- Franzluebbers, A. J.; M. Sebastiana; R. J. López; L. López; V. Muñoz; F. Moreno and J. M. Murillo 2012. Stratification ratios in a rainfed Mediterranean Vertisol in wheat under different tillage, rotation and N fertilisation rates. *Soil & Tillage Research*, 119: 7-12.
- Gee, G. W. and D. Or. 2002. Particle size analysis. pp: 255-293. In: Dane, J. H. y Topp, G.C. (Eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series No 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
- Grossman, R. B. and T. G. Reinsch. 2002. The solid phase. Bulk density and linear extensibility. pp: 201-228. In: Dane, J. H. and Topp, G. C. (Eds.). Methods of soil analysis. Part 4. Physical Methods. Soil Science Society of America. Book Series No 5. Madison, Wisconsin, USA. 1692 p.
- Horn, R.; K. H. Hartge; J. Bachmann, and M. B.Kirkham. 2007. Mechanical Stresses in Soils Assessed from Bulk-Density and Penetration-Resistance Data Sets. Soil Science Society of America Journal, 71(5): 1455- 1459
- Hamza, M.A. and W. K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. Review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*, 82: 121- 148.
- Hartge, R. und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Boden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Uberarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, 178p.
- Horn, R.; T. Wayb 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: 100-106.
- Horn, R.; H. Taubner; M. Wuttke and T. Baumgartl. 1993. Soil physical properties related

- to soil structure. *Soil & Tillage Research*, 30: 187-216.
- 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.
- 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.
- Lampurlanés, J. and C. Cantero-Martínez. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*, 95: 526-536.
- Lipiec J. 2004. Compaction effects on soil physical properties and root shoot growth. pp: 124-133. En: Glinsky, J.; Józefaciuk, G. and Stahr, K. (Eds). Soil-Plant-Atmosphere Aeration and Environmental Problems. Lublin, Stuttgart. 150 p.
- Martínez E.; J. P. Fuentes; P. Silva; S. Valle and E. Acevedo. 2008a. 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.
- Martínez E.; J. P. Fuentes and E. Acevedo. 2008b. Carbono orgánico y propiedades del suelo. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 8(1): 68- 96.
- Mulumba, L. and N.R. Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil & Tillage Research*, 98: 106-111.
- Nelson, D. and L. Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A. (Ed.). Methods of soil analysis. 2nd ed. ASA and SSSA, Madison WI. v. 2. 1.159p.
- Novoa, R.; S. Villaseca; P. del Canto; J. Rouanet; C. Sierra y del Pozo, A. 1989. Mapa agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuaria, area agroecológica. Ministerio de Agricultura. Santiago. 221p.
- Oorts, K.; H. Bossuyt; J. Labreuche; R. Merckx and B. Nicolardot. 2007. Carbon and nitrogen stocks in relation to organic matter fractions, aggregation and pore size distribution in no-tillage and conventional tillage in northern France. *European Journal of Soil Science*, 58: 248-259.
- 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.
- Pagliai, M. and N. Vignozzi. 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality. Pp: 71-82. In: Pagliai, M. and Jones, R. (Eds). Sustainable land management-environmental protection. A soil physical approach. Advances in Geoecology 35. IUSS. Catena Verlag. Reiskirchen. Germany. 588 p.
- Reynolds W.; B. Bowman; C. Drury; C. Tan and X. Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma*, 110: 131- 146.
- Reynolds W.D.; C. Drury; C.S. Tan; C.A. Fox and X.M. Yang. 2009. Use of indicators and pore volume function characteristics to quantify soil physical quality. *Geoderma*, 152: 252-263.
- Rudolffi, Y. 2008. Variación temporal de la estabilidad de los agregados de un suelo manejado con cero labranza y labranza convencional. Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. Santiago, Chile.

- Rühlmann, J.; M. Körschens and M. Graefe. 2006. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. *Geoderma*, 130: 272–283.
- Sandoval E.; J. Dörner, O. Seguel; J. Cuevas; y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Universidad de Concepción. Publicaciones Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Chillán, Chile, número 5, 80p.
- Seguel, O., C. Baginsky, A. Contreras, J. Covarrubias, C. González y M. Sandoval. 2011. Changes in physical properties of a Typic Haplocambid by annual crop culture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 11(1): 1- 15.
- Seguel, O.; V. García de Cortázar y M. Casanova. 2003. Variación en el tiempo de las propiedades físicas de un suelo con adición de enmiendas orgánicas. *Agricultura Técnica*, 63(3): 287-299.
- 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.
- Semmel, H.; R Horn; A. Dexter and E. Schulze. 1990. The dynamics of soil aggregate formation and the effect on soil physical properties. *Soil Technology*, 3:113-129.
- Six, J.; Elliot, E. and Paustian, K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 1350-1358.
- Six, J.; R. T. Conant; E. A. Paul and K. Paustian. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241: 155-176.
- Six, J.; H. Bossuyt; S. Degryze and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil & Tillage Research*, 79: 7-31.
- Taylor, H. M. and G. S. Brar. 1991. Effects of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*, 19: 111-119.
- Tisdall J. M. and J. M. Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, 33: 141- 163.
- Veiga, M; R. Horn; D. Reinert and J. Reichert. 2007. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. *Soil & Tillage Research*, 92: 104-113.
- Warrick, A. (Ed.). 2002. Soil physics companion. CRC Press. Boca Raton. USA. 387 p.
- Watts, C. W. and A.R. Dexter. 1998. Soil friability: theory, measurement and the effect of management and organic carbon content. *European Journal of Soil Science*, 49: 73-84.

APÉNDICE

Apéndice 1. Distribución de tamaño de partículas promedio y error estándar (%) antes de siembra y en espigadura para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT); bajo (IT) y fuera de la huella del tractor (OT).

		Textura (%)				
Fecha	Tamaño de partícula	Labranza	Huella	Profundidad (cm)		
				0 a 5	5 a 15	15 a 30
Antes de siembra	Arcilla	NT	IT	23,70(±0,65)	24,81(±0,10)	24,50(±0,85)
			OT	23,36(±0,61)	23,60(±0,61)	25,58(±1,80)
		CT	IT	24,09(±1,82)	25,77(±2,96)	27,58(±2,41)
			OT	27,97(±2,84)	25,38(±2,37)	26,86(±2,26)
	Limo	NT	IT	26,94(±6,87)	29,76(±1,80)	25,92(±3,08)
			OT	31,60(±2,04)	25,83(±4,81)	29,44(±1,85)
		CT	IT	26,63(±1,52)	23,27(±5,13)	27,06(±1,34)
			OT	28,03(±1,99)	24,67(±5,55)	30,38(±2,51)
	Arena	NT	IT	49,36(±7,41)	45,43(±1,81)	49,58(±3,91)
			OT	45,05(±2,15)	50,57(±4,42)	44,98(±2,70)
		CT	IT	49,29(±3,32)	50,96(±4,84)	45,36(±3,50)
			OT	44,00(±4,68)	49,94(±7,37)	42,76(±4,61)
Espigadura	Acilla	NT	IT	21,33(±1,06)	21,83(±0,77)	21,40(±0,75)
			OT	20,26(±0,67)	23,03(±0,52)	21,72(±0,73)
		CT	IT	12,67(±9,80)	23,54(±2,33)	26,36(±1,99)
			OT	23,50(±2,37)	23,53(±2,21)	26,06(±1,36)
	Limo	NT	IT	31,91(±2,08)	30,96(±2,11)	35,91(±1,22)
			OT	33,46(±2,36)	29,58(±1,00)	31,68(±1,61)
		CT	IT	23,03(±7,78)	30,86(±0,47)	29,60(±0,60)
			OT	27,57(±1,89)	28,62(±1,50)	26,58(±3,79)
	Arena	NT	IT	46,76(±1,86)	47,22(±1,66)	42,69(±1,89)
			OT	46,28(±2,67)	47,39(±1,47)	46,60(±1,95)
		CT	IT	64,3(±17,54)	45,60(±2,59)	44,04(±1,75)
			OT	48,94(±3,58)	47,85(±3,51)	47,36(±3,13)

Apéndice 2. Materia orgánica promedio (%) y error estándar antes de siembra y en espigadura para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT); bajo (IT) y fuera de la huella del tractor (OT).

Fecha	Labranza	Huella	Materia orgánica (%)					
			Profundidad (cm)					
			0 - 5		5 - 15		15 - 30	
Antes de siembra	NT		4,34	(±0,64)	3,12	(±0,38)	2,07	(±0,04)
	CT		2,56	(±0,39)	2,07	(±0,04)	2,45	(±0,18)
Espigadura	NT	IT	5,81	(±1,72)	3,75	(±0,76)	4,24	(±0,87)
		OT	5,68	(±1,38)	5,07	(±2,08)	3,12	(±0,58)
	CT	IT	2,52	(±0,22)	2,56	(±0,17)	3,15	(±0,38)
		OT	2,62	(±0,16)	2,53	(±0,08)	3,06	(±0,10)

Apéndice 3. Densidad real promedio (Mg m^{-3}) y error estándar antes de siembra y en espigadura para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT); bajo (IT) y fuera de la huella del tractor (OT).

Fecha	Labranza	Huella	Densidad real (Mg m^{-3})					
			Profundidad (cm)					
			0 - 5		5 - 15		15 - 30	
Antes de siembra	NT		2,51	(±0,05)	2,59	(±0,03)	2,61	(±0,05)
	CT		2,7	(±0,01)	2,64	(±0,03)	2,64	(±0,04)
Espigadura	NT	IT	2,47	(±0,09)	2,67	(±0,02)	2,57	(±0,06)
		OT	2,57	(±0,01)	2,61	(±0,02)	2,65	(±0,05)
	CT	IT	2,61	(±0,06)	2,6	(±0,06)	2,66	(±0,06)
		OT	2,61	(±0,08)	2,54	(±0,06)	2,67	(±0,02)

Apéndice 4. Densidad aparente por el método del cilindro (Mg m^{-3}) y error estándar para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Densidad aparente (Mg m^{-3})					
			Profundidad					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		1,28	($\pm 0,03$)	1,49	($\pm 0,04$)	1,57	($\pm 0,03$)
	CT		1,21	($\pm 0,03$)	1,24	($\pm 0,03$)	1,32	($\pm 0,03$)
Después de siembra	NT	IT	1,29	($\pm 0,07$)	1,50	($\pm 0,09$)	1,49	($\pm 0,07$)
		OT	1,45	($\pm 0,07$)	1,51	($\pm 0,05$)	1,36	($\pm 0,07$)
	CT	IT	1,48	($\pm 0,05$)	1,46	($\pm 0,07$)	1,41	($\pm 0,07$)
		OT	1,32	($\pm 0,06$)	1,31	($\pm 0,06$)	1,28	($\pm 0,02$)
Primer nudo	NT	IT	1,25	($\pm 0,09$)	1,33	($\pm 0,09$)	1,39	($\pm 0,04$)
		OT	1,41	($\pm 0,06$)	1,50	($\pm 0,05$)	1,45	($\pm 0,07$)
	CT	IT	1,35	($\pm 0,06$)	1,25	($\pm 0,05$)	1,23	($\pm 0,07$)
		OT	1,23	($\pm 0,04$)	1,23	($\pm 0,03$)	1,24	($\pm 0,03$)
Espigadura	NT	IT	1,26	($\pm 0,03$)	1,44	($\pm 0,01$)	1,45	($\pm 0,06$)
		OT	1,41	($\pm 0,06$)	1,40	($\pm 0,05$)	1,44	($\pm 0,03$)
	CT	IT	1,31	($\pm 0,04$)	1,38	($\pm 0,06$)	1,39	($\pm 0,05$)
		OT	1,21	($\pm 0,04$)	1,31	($\pm 0,05$)	1,24	($\pm 0,04$)

Apéndice 5. Poros de drenaje rápido promedio (% $>50\mu\text{m}$) y error estándar para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Poros de drenaje rápido (%)					
			Profundidad					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		15,4	($\pm 1,2$)	10,5	($\pm 0,5$)	8,8	($\pm 0,9$)
	CT		20,1	($\pm 0,8$)	19,6	($\pm 1,2$)	19,2	($\pm 1,0$)
Después de siembra	NT	IT	13,1	($\pm 0,7$)	13,0	($\pm 1,4$)	14,6	($\pm 0,8$)
		OT	13,0	($\pm 0,7$)	15,1	($\pm 1,0$)	18,5	($\pm 2,5$)
	CT	IT	15,1	($\pm 1,0$)	15,7	($\pm 1,0$)	16,2	($\pm 1,0$)
		OT	22,9	($\pm 1,5$)	22,9	($\pm 0,5$)	21,9	($\pm 0,5$)
Primer nudo	NT	IT	17,9	($\pm 1,8$)	19,0	($\pm 2,0$)	16,2	($\pm 0,3$)
		OT	12,5	($\pm 1,2$)	16,7	($\pm 0,3$)	15,6	($\pm 1,2$)
	CT	IT	18,0	($\pm 1,7$)	18,1	($\pm 1,1$)	21,5	($\pm 1,7$)
		OT	23,6	($\pm 1,2$)	21,2	($\pm 0,2$)	23,4	($\pm 0,7$)
Espigadura	NT	IT	12,7	($\pm 1,1$)	11,7	($\pm 0,9$)	11,3	($\pm 1,3$)
		OT	12,0	($\pm 1,5$)	10,9	($\pm 1,2$)	13,7	($\pm 0,6$)
	CT	IT	16,0	($\pm 1,3$)	19,1	($\pm 2,1$)	15,1	($\pm 1,0$)
		OT	17,8	($\pm 0,7$)	16,6	($\pm 1,4$)	17,5	($\pm 0,5$)

Apéndice 6. Poros de drenaje lento (% 10- 50 μ m) promedio y error estándar para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Poros de drenaje lento (%)					
			Profundidad					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		5,2	(\pm 0,4)	7,2	(\pm 1,8)	5,1	(\pm 0,3)
	CT		9,0	(\pm 0,4)	8,1	(\pm 0,68)	7,5	(\pm 0,6)
Después de siembra	NT	IT	4,8	(\pm 0,4)	4,3	(\pm 0,1)	4,6	(\pm 0,2)
		OT	4,8	(\pm 0,3)	5,4	(\pm 0,3)	5,8	(\pm 0,2)
	CT	IT	7,3	(\pm 0,1)	6,5	(\pm 0,4)	6,5	(\pm 0,3)
		OT	7,5	(\pm 0,6)	7,7	(\pm 0,8)	7,7	(\pm 0,5)
Primer nudo	NT	IT	3,1	(\pm 0,7)	3,8	(\pm 0,4)	4,6	(\pm 0,3)
		OT	3,4	(\pm 0,5)	4,8	(\pm 0,8)	4,9	(\pm 0,5)
	CT	IT	6,0	(\pm 0,4)	7,1	(\pm 1,1)	6,2	(\pm 0,8)
		OT	6,1	(\pm 0,7)	6,7	(\pm 0,3)	6,5	(\pm 1,0)
Espigadura	NT	IT	6,3	(\pm 0,3)	5,8	(\pm 0,5)	6,9	(\pm 0,8)
		OT	5,9	(\pm 0,4)	6,4	(\pm 0,6)	6,8	(\pm 0,6)
	CT	IT	5,2	(\pm 0,1)	7,0	(\pm 0,3)	6,2	(\pm 0,3)
		OT	6,2	(\pm 0,4)	5,4	(\pm 0,7)	6,1	(\pm 0,2)

Apéndice 7. Poros de agua útil promedio y error estándar (% 0,2- 10 μm) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Poros de agua útil (%)					
			Profundidad					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		13,0	($\pm 2,6$)	12,3	($\pm 1,4$)	11,8	($\pm 1,9$)
	CT		10,8	($\pm 1,4$)	12,8	($\pm 3,6$)	12,5	($\pm 0,9$)
Después de siembra	NT	IT	18,3	($\pm 1,5$)	12,8	($\pm 1,1$)	12,7	($\pm 0,3$)
		OT	19,1	($\pm 1,0$)	14,9	($\pm 1,7$)	10,7	($\pm 0,7$)
	CT	IT	13,3	($\pm 0,3$)	11,1	($\pm 1,9$)	11,8	($\pm 0,2$)
		OT	11,3	($\pm 0,9$)	11,1	($\pm 0,3$)	12,0	($\pm 0,6$)
Primer nudo	NT	IT	18,8	($\pm 0,9$)	14,1	($\pm 0,9$)	14,4	($\pm 0,8$)
		OT	18,2	($\pm 2,3$)	13,8	($\pm 1,8$)	15,0	($\pm 0,8$)
	CT	IT	14,5	($\pm 2,1$)	16,3	($\pm 1,7$)	15,9	($\pm 0,4$)
		OT	15,3	($\pm 0,6$)	15,0	($\pm 1,4$)	15,1	($\pm 1,1$)
Espigadura	NT	IT	16,0	($\pm 1,1$)	13,6	($\pm 1,1$)	13,9	($\pm 0,7$)
		OT	15,3	($\pm 1,4$)	16,4	($\pm 1,1$)	15,0	($\pm 0,8$)
	CT	IT	15,9	($\pm 1,2$)	15,2	($\pm 0,4$)	14,4	($\pm 0,7$)
		OT	13,0	($\pm 0,8$)	14,0	($\pm 0,7$)	14,3	($\pm 0,4$)

Apéndice 8. RD promedio y error estándar (%) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Relación de dispersión (%)					
			Profundidad					
			0-5		5- 15		15-30	
Antes de siembra	NT		47,6	(±2,2)	47,8	(±4,1)	53,3	(±1,4)
	CT		60,4	(±3,5)	65,9	(±5,6)	54,6	(±2,3)
Después de siembra	NT	IT	52,9	(±5,9)	44,8	(±3,6)	50,2	(±4,7)
		OT	53,0	(±2,7)	54,8	(±5,5)	51,0	(±1,6)
	CT	IT	61,1	(±4,7)	63,0	(±5,2)	62,0	(±3,4)
		OT	62,1	(±2,9)	64,1	(±4,8)	68,8	(±6,3)
Primer nudo	NT	IT	42,2	(±4,2)	44,4	(±0,5)	42,6	(±5,8)
		OT	40,4	(±4,7)	49,0	(±4,8)	46,8	(±3,3)
	CT	IT	54,7	(±1,8)	49,8	(±4,7)	52,3	(±6,9)
		OT	56,9	(±2,3)	44,1	(±5,6)	50,1	(±5,9)
Espigadura	NT	IT	47,3	(±6,1)	49,6	(±1,9)	50,4	(±2,4)
		OT	43,9	(±4,8)	51,6	(±5,1)	46,7	(±1,6)
	CT	IT	49,1	(±3,1)	45,7	(±2,6)	51,3	(±2,8)
		OT	49,5	(±1,1)	54,6	(±5,5)	56,9	(±4,3)

Apéndice 9. VDMA promedio y error estándar (mm) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	VDMA (mm)					
			Profundidad					
			0-5		5- 15		15-30	
Antes de siembra	NT		1,41	(±0,38)	4,52	(±0,68)	5,59	(±0,41)
	CT		4,01	(±0,42)	3,00	(±0,31)	3,71	(±0,53)
Después de siembra	NT	IT	2,54	(±0,65)	2,48	(±0,60)	5,62	(±0,73)
		OT	1,53	(±0,46)	4,03	(±0,44)	5,62	(±0,73)
	CT	IT	4,42	(±0,61)	6,83	(±0,83)	4,96	(±1,06)
		OT	6,12	(±0,97)	5,33	(±0,75)	8,75	(±0,87)
Macolla	NT	IT	3,44	(±1,48)	7,71	(±1,36)	8,86	(±1,36)
		OT	2,4	(±0,62)	6,74	(±1,80)	8,52	(±1,10)
	CT	IT	6,55	(±0,26)	6,46	(±0,27)	5,05	(±0,92)
		OT	10,23	(±0,73)	8,84	(±1,44)	7,15	(±0,95)
Espigadura	NT	IT	2,28	(±1,18)	3,66	(±0,76)	5,22	(±0,82)
		OT	2,06	(±1,08)	4,44	(±0,74)	5,08	(±0,53)
	CT	IT	6,3	(±1,01)	5,92	(±0,55)	4,55	(±0,45)
		OT	6,65	(±0,66)	9,12	(±0,53)	7,04	(±1,12)

Apéndice 10. Resistencia a la penetración promedio y error estandar(kPa) para cero labranza (NT) y labranza convencional (CT), sobre la huella del tractor (IT) y fuera de la huella del tractor (OT) para tres profundidades.

Fecha	Labranza	Huella	Resistencia a la penetración (kPa)					
			Profundidad					
			0-5		5-15		15-30	
Antes de siembra	NT		2349	(±367)	4017	(±227)	4804	(±304)
	CT		566	(±94)	1072	(±163)	1837	(±250)
Despues de siembra	NT	IT	978	(±345)	3891	(±887)	4879	(±822)
		OT	1179	(±379)	1272	(±878)	2771	(±374)
	CT	IT	679	(±164)	1181	(±246)	1182	(±202)
		OT	243	(±52)	831	(±166)	2583	(±824)
Primer nudo	NT	IT	1901	(±515)	5558	(±890)	6585	(±780)
		OT	1061	(±327)	5215	(±642)	6348	(±529)
	CT	IT	2775	(±1145)	5212	(±1221)	6348	(±809)
		OT	2380	(±543)	4096	(±902)	4858	(±915)
Espigadura	NT	IT	3581	(±718)	6889	(±713)	6587	(±608)
		OT	2486	(±761)	5941	(±254)	6353	(±867)
	CT	IT	2070	(±524)	4060	(±1084)	5185	(±881)
		OT	2043	(±1182)	3675	(±1001)	4465	(±657)