



**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

**EFFECTO DE LA ROTACIÓN DE CULTIVOS Y EL SISTEMA DE LABRANZA EN  
LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DE TRIGO EN  
UN MOLLISOL DE CLIMA MEDITERRÁNEO**

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de  
Magister en Ciencias Agropecuarias mención Producción de Cultivos

**WALTER EDUARDO VERGARA SEPÚLVEDA**

Directores de Tesis  
PAOLA SILVA CANDIA  
OSCAR SEGUEL SEGUEL

Profesores consejeros  
MANUEL CASANOVA PINTO  
JUAN PABLO FUENTES ESPOZ

SANTIAGO - CHILE  
2016

**UNIVERSIDAD DE CHILE**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**

EFECTO DE LA ROTACIÓN DE CULTIVOS Y EL SISTEMA DE LABRANZA EN  
LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DE TRIGO EN UN  
MOLLISOL DE CLIMA MEDITERRÁNEO

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de  
Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias mención  
Producción de cultivo

**WALTER EDUARDO VERGARA SEPÚLVEDA**

	Calificaciones (Memoria de Título)	Calificaciones (Tesis de Grado)
<b>DIRECTOR DE TESIS</b>		
Paola Silva Candía Ingeniera Agrónoma, Dra.	7,0	Aprobado
Oscar Seguel Seguel Ingeniero Agrónomo, Dr.	6,8	Aprobado
<b>PROFESORES CONSEJEROS</b>		
Manuel Casanova Pinto Ingeniero Agrónomo, MS.	6,8	Aprobado
Juan Pablo Fuentes Espoz Ingeniero Forestal, Ph.D.	6,5	Aprobado

Santiago, Chile  
2016

## AGRADECIMIENTOS

Por fin se termina este proceso, el cual fue realmente extenso, y no queda más que agradecer a todos los que permitieron que esto fuera posible.

Primero quiero agradecer a mis profesores guías Paola Silva y Oscar Seguel por el apoyo, las recomendaciones, las enseñanzas que me entregaron en el desarrollo de esta tesis.

A mis padres María Inés Sepúlveda y Walter Vergara, a todos mis familiares y mejor amiga Lidia por el apoyo durante toda la carrera.

A las personas que amablemente me ayudaron en el trabajo de campo, desde abrir las calicatas hasta la cosecha del trigo especialmente a Marcelo Becerra, Diego Fredes, Ángela Faundez, Daniela Meza, Raúl Muñoz. A Don Hugo que me ayudó con los análisis de muestras en el laboratorio de física de suelo. Al laboratorio SAP por permitirme ser parte de un grupo de trabajo y amigos.

Le agradezco a todos mis amigos de la generación que me entregaron el apoyo para poder terminar esta tesis (recuerden que el apoyo es mutuo), como Andrés Martínez, Nicolás Villacura, Paula Villalón, Héctor Tabilo, Constanza Parra, Oscar Santibáñez, Rodrigo Muñoz, José Luis Díaz, Fernando Avendaño, Nicolás Riveras, Felipe Montoya, Geraldine Allende, Carla Silva, Mariana Muñoz, etc.

Pero no me puedo olvidar de gente increíble que conocí de otras generaciones, como Valentina Canelo, Catalina Duran, Adolfo Pardo, Daniel Cubillos, Arantza Garay, Valentina Castro, Ricardo Quintana, Elizabeth Rain, María José Olgún, Manuel Cáceres, etc. y las cuales también me entregaron su apoyo, bromearon que esto nunca se iba a terminar, siempre preguntaban sobre mi tesis. Como también agradecer a los profesores que me permitieron ser su ayudante, lo cual me permitió desarrollarme más y conocer a grandes personas. Finalmente a los funcionarios que siempre estuvieron ahí, especialmente Chamorro y la Tía de Quiosco por sus conversaciones.

Podría seguir poniendo el nombre de muchas más personas, pero los agradecimientos serían más largos que la tesis, lo importante es que siempre recordare a todas las personas con las que compartí y ayude en estos años de universidad, y gracias por los momentos de conversación, por las copuchas, por los carretes, por las risas y mucho más.

## ÍNDICE

CAPÍTULO I: ROTACIÓN DE CULTIVOS EN CERO LABRANZA COMO ESTRATEGIA DE PREVENCIÓN DE LA COMPACTACIÓN SUPERFICIAL .....	1
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	1
Introducción .....	1
Efecto de la labranza convencional y cero labranza sobre las propiedades físicas de suelo .....	2
Efecto de la rotación de cultivos en las propiedades físicas de suelo manejados en cero labranza y labranza convencional .....	4
Efecto de las raíces de los cultivos en las propiedades físicas de suelo.....	5
Efecto de la interacción del sistema de labranza con el año en el rendimiento de trigo .....	5
Efecto de la interacción del sistema de labranza con la rotación de cultivo en el rendimiento de trigo .....	6
Consideraciones finales.....	7
LITERATURA CITADA.....	8
CAPÍTULO II: EFECTO DE LA ROTACIÓN DE CULTIVOS Y EL SISTEMA DE LABRANZA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DE TRIGO EN UN MOLLISOL DE CLIMA MEDITERRÁNEO .....	11
RESUMEN.....	11
ABSTRACT.....	12
INTRODUCCIÓN .....	13
HIPÓTESIS.....	15
OBJETIVOS .....	15
Objetivo General .....	15
Objetivos Específicos.....	15
MATERIALES Y MÉTODO .....	16
Lugar de estudio.....	16
Historial del suelo .....	17
Tratamientos, diseño del experimento y labores culturales .....	17
Mediciones de suelo .....	18
Mediciones del cultivo .....	19
Datos climáticos .....	20
Análisis estadístico.....	20
RESULTADOS.....	21
Propiedades físicas de suelo.....	21

Densidad real .....	21
Densidad aparente.....	21
Porosidad total .....	22
Poros de drenaje rápido .....	23
Poros de drenaje lento.....	24
Poros de agua útil.....	25
Poros de agua no utilizable .....	26
Resistencia a la penetración.....	27
Estabilidad de macroagregados .....	28
Estabilidad de microagregados .....	29
Datos climáticos .....	31
Rendimiento de trigo y sus componentes .....	32
Efecto de la rotación de cultivos en el rendimiento y sus componentes .....	33
DISCUSIÓN .....	40
Propiedades físicas de suelo.....	40
Rendimiento del cultivo .....	45
CONCLUSIONES .....	48
LITERATURA CITADA.....	49
APÉNDICES.....	55
ANEXOS .....	58

# **CAPÍTULO I: ROTACIÓN DE CULTIVOS EN CERO LABRANZA COMO ESTRATEGIA DE PREVENCIÓN DE LA COMPACTACIÓN SUPERFICIAL**

## **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **Introducción**

La compactación del suelo es uno de los principales problemas en la producción de cultivos, siendo la agricultura moderna la principal causante, al producir una degradación de las propiedades físicas del suelo por una alta intensidad de uso (D'Haene *et al.*, 2008, Lipiec y Hatano, 2003). El principal factor asociado a la compactación es el aumento del uso de la maquinaria (Glab, 2007), sumado al mayor peso de esta para incrementar la potencia necesaria para la realización de la labranza (Horn, 2003).

La compactación del suelo provoca efectos adversos en su funcionalidad por la pérdida de poros gruesos, lo que incluso puede llegar a producir erosión por escorrentía superficial (Batey, 2009). Desde el punto de vista de los cultivos, ocurren restricciones mecánicas para las raíces, reducción de la absorción de nutrientes y problemas de anoxia, generando problemas de crecimiento de raíces e incluso la muerte de plantas (Martínez *et al.*, 2008).

La compactación del suelo se puede identificar a través de distintas variables físicas, como la densidad aparente, la resistencia a la penetración, la macroporosidad, los cambios en la estructura y la velocidad de infiltración, condiciones que provocan problemas de anegamiento y una mala distribución de las raíces en el perfil de suelo (Batey, 2009).

Las prácticas de labranza y las rotaciones de cultivos son dos de los manejos que afectan a las propiedades físicas (D'Haene *et al.*, 2008; Katsvairo *et al.*, 2002). La cero labranza, junto con la mantención de los residuos orgánicos sobre el suelo y las rotaciones de cultivos, generan un efecto positivo en la calidad física, química y biológica del suelo (Govaerts *et al.*, 2006). Con estas prácticas aumenta el contenido de materia orgánica, como también se mejora el almacenamiento de agua (Stone y Schlegel, 2010). Sin embargo, la cero labranza provoca efectos negativos, los cuales son predominantes en la capa superficial del suelo (los primeros 5 cm), generando una mayor resistencia mecánica asociada a una compactación por la pérdida de macroporos, lo que en algunos casos conlleva a una menor infiltración del agua (Martínez *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2012).

Por su parte, la secuencia de cultivos en una rotación tiene un efecto importante en cortar ciclos de enfermedades, mejorar el control de malezas y aumentar el aprovechamiento de nutrientes como nitrógeno y fósforo (Silva *et al.*, 2015). Además, la secuencia de cultivos con distinto sistema radical tiene un impacto sobre las propiedades físicas del suelo,

incrementando la infiltración de agua y la porosidad (Tracy *et al.*, 2012); sin embargo, este último aspecto ha sido poco estudiado, por lo que conocer su impacto mejorará los manejos agronómicos sustentables (Mera y Rouanet, 2003).

Esta monografía tiene por objetivo describir el impacto de los sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo y analizar el efecto de la rotación de cultivos como una posible estrategia de reducción en la compactación de suelo, estableciendo si estos cambios implican diferencias en el rendimiento de trigo.

### **Efecto de la labranza convencional y cero labranza sobre las propiedades físicas de suelo**

La labranza convencional, a través de sus diversas labores, tiene como objetivo la formación de una óptima cama de semillas, para que el cultivo tenga una óptima germinación y establecimiento. A su vez, la labranza convencional permite un mejor control de malezas, al desarraigarlas desde el suelo. También ayuda en la incorporación en el suelo de productos como enmiendas o residuos de cultivos de la temporada anterior. Esto se logra con un movimiento importante de suelo a través de la aradura y el rastraje, que tienen como objetivo la inversión y el mullimiento del suelo (Acevedo y Martínez, 2003).

Si bien la labranza convencional puede facilitar estos manejos agronómicos, también genera problemas en el suelo, principalmente en los aspectos físicos de éste. Esto se debe a que con el uso prolongado de la labranza hay una alteración en la estructura del suelo (Fuentes *et al.*, 2009), así como una disminución del contenido de materia orgánica, producto de la oxidación que se realiza por las sucesivas inversiones de suelo (Stone y Schlegel, 2010). Este efecto se acentúa con las precipitaciones o riegos después de la labranza, debido a la erosión o arrastre de las partículas de suelo (Lado *et al.*, 2004).

La disminución de materia orgánica por efecto de la labranza convencional genera un deterioro en la estructuración del suelo, evidenciado por una disminución en la estabilidad de agregados, los cuales se dispersarán fácilmente en contacto con el agua, disminuyendo la velocidad de infiltración por una pérdida de funcionalidad porosa (Fuentes *et al.*, 2009; Castellini y Ventrella, 2012). Este proceso lleva asociado la movilización de las partículas finas del suelo, generando un encostramiento en superficie como también un colapso de la porosidad, provocando un menor almacenamiento de agua y un aumento en la densidad aparente de los suelos (Martínez *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2012).

En respuesta a esto han surgido estrategias de labranza conservacionista, destacando la cero labranza, en la cual no se realiza una disturbación importante del perfil de suelo y se mantienen los rastros de los cultivos en la superficie, manteniendo una mejor estructura de suelo (Fuentes *et al.*, 2009).

Muchas son las ventajas que se pueden asociar a este sistema de labranza, entre las cuales se puede considerar un mayor contenido de agua en el perfil (Jemai *et al.*, 2013). Esto se debe a que la cubierta de rastros evita la evaporación directa de agua desde el suelo

(Brooks *et al.*, 2010); por otra parte, la protección física del rastrojo contra el impacto directo de las precipitaciones impide el encostramiento y evita la escorrentía superficial (Jordán *et al.*, 2010). La mayor disponibilidad de agua para el crecimiento del cultivo es favorecida por el mayor contenido de materia orgánica, que al actuar como un coloide genera a su vez una mejor fertilidad de suelo (Fuentes *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2012).

En cero labranza se pueden observar otros efectos positivos en las propiedades físicas de suelo, destacando la mayor estabilidad de agregados y una mayor infiltración de agua (Stone y Schlegel, 2010). También se produce una menor resistencia a la penetración, efecto que se acrecienta con la presencia de rastrojos sobre el suelo (Fuentes *et al.*, 2009).

Se debe considerar que si bien existen casos en donde se observan efectos positivos en las propiedades físicas de suelo, también se pueden observar efectos negativos en suelos bajo cero labranza. En este sentido, Martínez *et al.* (2008) y Bhattacharyya *et al.* (2006), determinaron que en este sistema de labranza hay un aumento de la densidad aparente y la resistencia a la penetración en los primeros 15 cm de suelo, como también pérdida de la macroporosidad.

Según un estudio realizado por Huang *et al.* (2012) en un suelo franco limoso, en cero labranza se genera una mayor resistencia a la penetración en comparación con la labranza convencional en los primeros 20 cm de profundidad, diferencias que no se manifestaron a mayor profundidad. En un meta-análisis de diversos ensayos realizados en Argentina, también se han observado mayores valores de densidad aparente en cero labranza que en labranza convencional en superficie (Alvarez y Steinbach, 2009). Esta mayor resistencia mecánica, como también la mayor densidad aparente, podrían asociarse a problemas de compactación, los cuales dependen de la textura del suelo. Sin embargo, por lo general para este sistema de labranza el problema se presenta sólo en los primeros centímetros de suelo, debido al gran peso de las máquinas de cero labranza (Agostini *et al.*, 2012). Esta condición genera problemas de anegamiento en periodos de alta precipitación y de sequía en los periodos de baja precipitación, además de problemas de crecimiento de raíces al existir una mayor impedancia mecánica (Strudley *et al.*, 2008). Estas diferencias generadas por lo sistemas de labranza en las propiedades físicas de suelo afectan el crecimiento radical (Martino y Shaykewich, 1994; Martínez *et al.*, 2008), es así como la mayor masa de raíces en cero labranza se concentra en los primeros 10 cm de profundidad, mientras que en la labranza convencional, la masa de raíces es más uniforme en el perfil (Guan *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2008). Cabe destacar que este patrón de distribución de raíces se debe principalmente a la presencia de capas compactadas en el perfil, las que disminuirán el crecimiento en profundidad (Materechera *et al.*, 1992).



## **Efecto de la rotación de cultivos en las propiedades físicas de suelo manejados en cero labranza y labranza convencional**

La rotación de cultivos puede mejorar las propiedades físicas del suelo, sin embargo, bajo labranza convencional su efecto en la estructura y otras propiedades físicas es poco importante, debido al fuerte impacto que tiene la inversión y mullimiento de suelo durante la preparación para la siembra de cada temporada. Esto se puede observar en la investigación realizada por Głąb *et al.* (2013), en la cual compararon un monocultivo de triticale con dos rotaciones (remolacha-triticale-haba-triticale y triticale-triticale-avena), encontrando una menor densidad aparente y un mayor número de poros totales, especialmente de macroporos, sólo en la fase de remolacha. Sin embargo, los autores señalan que este cambio en el sistema poroso del suelo no fue permanente, debido al movimiento del suelo que se realizaba durante la labranza previa a la siembra del siguiente cultivo.

En el sistema de cero labranza el efecto esperado de las rotaciones es mayor, ya que no está presente la preparación de suelo, dejando a la raíz y los residuos aéreos del cultivo como los principales agentes de cambio en la estructura de suelo (Martins *et al.*, 2009; Milleret *et al.*, 2009). Esto se puede ejemplificar con diversos estudios, en donde se han obtenido efectos positivos en las propiedades físicas de suelo, destacando un estudio de 30 años realizado por Munkholm *et al.* (2013) en un suelo franco limoso clasificado como Luvisol, en el que se observó una mejor estructuración del suelo en la rotación maíz-avena-cebada que en el monocultivo de maíz. Este parámetro fue medido bajo una evaluación óptica de estructura de suelo, en la cual se consideran el tamaño de los agregados, la porosidad del suelo y el crecimiento de raíces. Sin embargo, no hubo diferencias en la densidad aparente ni en la resistencia a la penetración entre las rotaciones. Por otra parte, en un ensayo de 4 años realizado en un Oxisol tropical, Martins *et al.* (2009) observaron una mayor estabilidad y tamaño de agregados en el monocultivo de maíz que en la rotación arroz-poroto-algodón-poroto, debido a una mayor producción de mucílagos exudados por la raíz del maíz, como también a la mayor cantidad de rastrojos dejados sobre la superficie del suelo.

Bhattacharyya *et al.* (2006), estudiaron una rotación de 5 años con leguminosas en un suelo franco arcillo arenoso, encontrando efectos significativos de la rotación soya-trigo en relación a las rotaciones soya-lenteja y soya-poroto, observando una mayor densidad aparente en los primeros 15 cm de profundidad en la primera rotación.

La ausencia de efectos por parte de las rotaciones también se observó en un estudio de 6 años en un suelo franco limoso (Katsvairo *et al.*, 2002), donde al comparar un monocultivo de maíz con las rotaciones soya-maíz y soya-trigo/trébol-maíz bajo un sistema de cero labranza, no se tuvieron efectos en la densidad aparente, la resistencia a la penetración ni en la porosidad. Finalmente, en un estudio realizado por Madari *et al.* (2005) en un Ferralsol con alto contenido de arcilla bajo un clima subtropical, no se encontraron diferencias en las propiedades físicas del suelo entre las rotaciones soya-trigo y lupino-maíz-avena-soya/trigo.

## **Efecto de las raíces de los cultivos en las propiedades físicas de suelo**

Las raíces de los cultivos generan un aumento de la estabilidad de los agregados (Hallet *et al.*, 2009), lo cual se manifestará a su vez en otras propiedades físicas, como la resistencia a la penetración y la densidad aparente. Este efecto ocurre por la acción de la raíz al atrapar y secar las partículas del suelo, lo que genera agregados estables, como también por el efecto provocado por los distintos tipos de crecimiento de raíces, contrastando los sistemas radicales fasciculados y pivotantes (Martins *et al.*, 2009; Milleret *et al.*, 2009).

Una vez que las raíces se degradan, producen canales que provocan una mayor porosidad total, como también una mayor conductividad hidráulica (Huang *et al.*, 2012). En este sentido, un cultivo con mayor densidad de raíces, como también mayor densidad de plantas que genere mayores puntos donde se concentren las raíces, como es el caso del trigo, generará una mayor porosidad total (Fuentes *et al.*, 2009).

Algunos cultivos como el maíz poseen un efecto importante en la estructuración de los suelos, mediante la producción de exudados generados por la raíz. Dentro de estos exudados destacan los mucílagos, los cuales son agentes cementantes que favorecen la estabilización de los agregados, además de mantener un buen contacto suelo-raíz en suelos bajo sequía (Martins *et al.*, 2009; Tracy *et al.*, 2011).

Otros efectos que se pueden considerar son la cantidad y tipo de residuos que permanecen como fuente de materia orgánica (Anyanzwa *et al.*, 2010). También es importante la densidad del cultivo y la capacidad de fijar nitrógeno, como ocurre con las leguminosas, lo que generará un mayor crecimiento de raíces y de la parte aérea del siguiente cultivo, aportando una mayor biomasa residual al suelo (Bhattacharyya *et al.*, 2006; Fuentes *et al.*, 2009; Milleret *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2012).

## **Efecto de la interacción del sistema de labranza con el año en el rendimiento de trigo**

Se pueden observar diferencias en el rendimiento al comparar los sistemas de labranza. En cero labranza, la menor temperatura y la mayor contenido de agua del suelo por efecto del mulch superficial genera diferencias con la labranza convencional, desde el punto de vista del crecimiento y desarrollo del cultivo dentro de la temporada, observándose que en los primeros estados de desarrollo la tasa de crecimiento y el paso a nuevos estados es más lento, pero esto se compensa en las etapas finales del cultivo, afectando positivamente el rendimiento en granos (Verhulst *et al.*, 2011).

Por otra parte, en diversos estudios se observa que existe una gran importancia en la interacción del sistema de labranza con el año, observando que en el sistema de cero labranza aumenta el rendimiento de distintos cereales en años secos en comparación a la labranza convencional (De Vita *et al.*, 2007; Ben Moussa-Machraoui *et al.*, 2010; Martínez *et al.*, 2011; Morell *et al.*, 2011; Pittelkow *et al.*, 2015). Sin embargo, en otros estudios (Mrabet, 2011; Amato *et al.*, 2013; Shertzer, 2013; Pittelkow *et al.*, 2015) se ha observado

que en ambientes o años húmedos el rendimiento de cereales en cero labranza disminuye en comparación a la labranza convencional.

### **Efecto de la interacción del sistema de labranza con la rotación de cultivo en el rendimiento de trigo**

El efecto de la interacción sistema de labranza con la rotación de cultivo en el rendimiento será distinto dependiendo del tipo de cultivo y el lugar donde se realice el ensayo, como también del manejo que se le realiza al rastrojo (Fuentes *et al.*, 2009). Muy estudiado es el efecto que tienen ambos factores por separado, pero en relación a la interacción no se tiene mucha información. Esto se puede ejemplificar en un estudio de rotación de cultivos y sistemas de labranza realizado en un suelo franco arcillo arenoso, en donde se observaron mejores rendimientos de maíz en rotación con soya que en un monocultivo de soya o un monocultivo de maíz (Wilhelm y Wortmann, 2004).

En otro estudio, realizado por Amato *et al.* (2013) en un ambiente mediterráneo, se determinó que la interacción del sistema de labranza con el año es lo que más influye en el rendimiento, sin embargo la interacción del sistema de labranza con la rotación de cultivos influye en la variabilidad temporal. En este sentido, los autores observaron que el monocultivo de trigo disminuye el rendimiento año a año de mayor forma en cero labranza, debido a la mantención del rastrojo, lo que genera una mayor incidencia de patógenos en el cultivo. El efecto de esta interacción en el rendimiento se puede correlacionar con los cambios en las propiedades físicas de suelo que genera esta interacción. De acuerdo con esto, Munkholm *et al.* (2013) determinaron una correlación para el rendimiento según la estructura del suelo, obteniendo efectos de la interacción entre las rotaciones de cultivos y los sistemas de labranza; de este modo, rotaciones que presentan una mayor variabilidad de especies afectan positivamente las propiedades físicas de suelo, mejorando su estructuración y disminuyendo la resistencia a la penetración, lo que permite un mayor crecimiento de raíces, generando un efecto positivo en el rendimiento.

## Consideraciones finales

Los distintos sistemas de labranza como las distintas rotaciones de cultivos tienen un efecto dispar en las propiedades físicas del suelo, como la densidad aparente, la resistencia a la penetración y la estructura. Esto ocurre principalmente por los tipos de suelo en que se realizan los diversos ensayos, las condiciones climáticas y las distintas alternativas en la rotación de cultivos. En este sentido, suelos con texturas más pesadas serán más propensos a problemas de compactación, la cual variará en su profundidad dependiendo del tipo de labranza (Kaiser *et al.*, 2013).

En los distintos sistemas de labranza se tiene un efecto estructurante producido por el crecimiento de las raíces. Se espera que este efecto sea mayor en un sistema de cero labranza que en labranza convencional, debido a que en este último sistema se va perdiendo el efecto logrado por las raíces como consecuencia de las inversiones o perturbaciones en el perfil del suelo por efecto de los implementos de labranza. Además, en cero labranza hay una mayor presencia de agentes cementantes, como los exudados de raíces o del rastrojo que va quedando.

Es importante estudiar el efecto que tiene la rotación al variar cada temporada el hábito de crecimiento de raíces de distintos cultivos y poder evaluar si ese efecto tendrá una disminución en la compactación superficial generada por el sistema de cero labranza.

Cabe destacar que una rotación de cultivos en un sistema de labranza convencional también puede generar un efecto en las propiedades físicas de suelo, como la disminución de la densidad aparente (Głąb *et al.*, 2013), pero este resultado se logra sólo en algunos cultivos de la rotación. El efecto está dado por el tipo de crecimiento de la raíz de los cultivos, así como por el tipo de cosecha, en la que se puede remover parte del suelo (remolacha).

Considerando las distintas variables y factores analizados, aún queda por estudiar los efectos de las interacciones específicamente en lo que respecta a sistemas de labranza y rotaciones.

## LITERATURA CITADA

- Acevedo E. y E. Martínez. 2003. Sistemas de labranza y productividad de los suelos (cap. 2, pp.13-27). En: Acevedo E. (Ed.) Sustentabilidad en cultivos anuales: cero labranza y manejo de rastrojos. Santiago, Chile. 184p.
- Agostini, M.; G. Studdert; S. Martino; J. Costa; R. Balbuena; J. Ressia; G. Mendivil and L. Lázaro. 2012. Crop residue grazing and tillage systems effects on soil physical properties and corn (*Zea mays* L.) performance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2): 271-282.
- Alvarez, R. and H. Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*, 104(1): 1-15.
- Amato, G.; P. Ruisi; A. Frenda; G. Di Miceli; S. Saia; A. Plaia and D. Giambalvo. 2013. Long-term tillage and crop sequence effects on wheat grain yield and quality. *Agronomy Journal*, 105(5): 1317-1327.
- Anyanzwa, H.; J. Okalebo; C. Othieno; A. Bationo; B. Waswa and J. Kihara 2010. Effects of conservation tillage, crop residue and cropping systems on changes in soil organic matter and maize-legume production: a case study in Teso District. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88(1): 39-47.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25: 335-345.
- Ben Moussa-Machraoui, S.; F. Errouissi; M. Ben-Hammouda and S. Nouria. 2010. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil and Tillage Research*, 106: 247-253.
- Bhattacharyya, R.; V. Prakash; S. Kundu and H. S. Gupta. 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil and Tillage Research*, 86: 129-140.
- Brooks, J.R.; H.R. Barnard; R. Coulombe and J.J. McDonnell. 2010. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geoscience*, 3(2): 100-104.
- Castellini, M. and D. Ventrella. 2012. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 124: 47-56.
- D'Haene, K.; J. Vermang; W. M. Cornelis; B. L. M. 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 and Tillage Research*, 99: 279-290.
- De Vita, P.; E. Di Paolo; G. Fecondo; N Di Fonzo and M. Pisante. 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 92: 69-78.
- Fuentes, M.; B. Govaerts; F. De León; C. Hidalgo; L. Dendooven; K. D. Sayre and J. Etchevers. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy*, 30: 228-237.
- Głąb, T. 2007. Effect of soil compaction on root system development and yields of tall fescue. *International Agrophysics*, 21: 233-239.

- Głąb, T.; B. Ścigalska and B. Łabuz. 2013. Effect of crop rotations with triticale (*× Triticosecale* Wittm.) on soil pore characteristics. *Geoderma*, 202-203(2013): 1-7.
- Govaerts, B.; M. Mezzalama; K. D. Sayre; J. Crossa; J. M. Nicol and J. Deckers. 2006. Long-term consequences of tillage, residue management, and crop rotation on maize/wheat root rot and nematode populations in subtropical highlands. *Applied Soil Ecology*, 32: 305-315.
- Guan, D.; Y. Zhang; M. Al-Kaisi; Q. Wang; M. Zhang and Z. Li. 2015. Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain. *Soil and Tillage Research*, 146: 286-295.
- Hallet P., D. Feeney; A.G. Bengough; M. Rillig; C. Scrimgeour and I. Young. 2009. Disentangling the impact of AM fungi versus root on soil structure and water transport. *Plant and Soil*, 314(1-2): 183-196.
- Horn, R. 2003. Stress-strain effects in structured insaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116: 77-88.
- Huang, G.; Q. Chai; F. Feng and A. Yu. 2012. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Arid Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(8): 1286-1296.
- Jemai, I.; N. Ben Aissa; S. Ben Guirat; M. Ben-Hammouda and T. Gallalli. 2013. Impact of three and seven years of no tillage on the soil water storage, in the plant root zone, under a dry subhumid Tunisian climate. *Soil and Tillage Research*, 126: 26-33.
- Jordán, A.; L. M. Zavala and J. Gil. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena*, 81(1): 77-85.
- Kaiser, D. R.; M. Fernandes; J. M. Reichert; D. J. Reinert; R. Horn; H. Fleige and A. A. Brandt. 2013. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the subtropics and tropics: a review. *Advances in Geocology*, 42: 282-337.
- Katsvairo, T.; W. J. Cox and H. van Es. 2002. Tillage and rotation effects on soil physical characteristics. *Agronomy Journal*, 94: 299-304.
- Lado, M.; A. Paz and M. Ben-Hur. 2004. Organic matter and aggregate size interactions in infiltration, seal formation and soil loss. *Soil and Tillage Research*, 68: 935-942.
- Lipiec, J. and R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116: 107-136.
- Madari, B.; P. Machado; E. Torres; A. Andrade and L. Valencia. 2005. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 80: 185–200.
- 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 and Tillage Research*, 99: 232-244.
- Martínez, I.; C. Ovalle; A. Del Pozo; H. Uribe; N. Valderrama; C. Prat and E. Zagal. 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(4): 615-622.
- Martino, D.L. and C.F Shaykewich. 1994. Root penetration profiles of wheat and barley as affected by soil penetration resistance in field conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 74: 193-200.

- Martins, M.; J. Cora; R. Jorge and A. Marcelo. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 104(1): 22-29.
- Materechera, S.; A. Alston; J. Kirby; and A. Dexter. 1992. Influence of root diameter on the penetration of seminal roots into a compacted subsoil. *Plant and Soil*, 144(2): 297-303.
- Mera, M. and J.L. Rouanet. 2003. Contribución de las leguminosas de grano en rotación con cereales: una revisión. (cap. 8, pp: 135-156) In: Acevedo, E. (Ed). Sustentabilidad en cultivos anuales: cero labranza, manejo de rastrojos. Santiago, Chile. 184p.
- Milleret, R.; R. Bayon and J. Gobat. 2009. Root, mycorrhiza and earthworm interactions: their effects on soil structuring processes, plant and soil nutrient concentration and plant biomass. *Plant and Soil*, 316(1-2): 1-12.
- Morell, F.; J. Lampurlanés; J. Álvaro-Fuentes and C. Cantero-Martínez. 2011. Yield and water efficiency of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Long-term effects of tillage and N fertilization. *Soil and Tillage Research*, 117: 76-84.
- Mrabet, R. 2011. Effects of residue management and cropping systems on wheat yield stability in a semiarid Mediterranean clay soil. *American Journal of Plant Sciences*, 2(02): 202-216.
- Munkholm, L.; R. Heck and B. Deen. 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 127: 85-91.
- Pittelkow, C. M.; B. A. Linquist; M. E. Lundy; X. Liang; K. J. Van Groenigen; J. Lee; N. Van Gestel; J. Six; R. T. Venterea and C. Van Kessel. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183: 156-168.
- Shertzer, G. 2013. Estudio comparativo de sistemas de labranza y rotaciones de cultivos y sus efectos en el rendimiento de trigo y la productividad del suelo. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias Mención en Producción de Cultivos. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. 70h.
- Silva, P.; W. Vergara y E. Acevedo. 2015. Rotación de cultivos. (cap. 3, pp. 49-68). En: Ruiz, S. (Ed.). Rastrojo de Cultivos y Residuos Forestales, Programa de Transferencia de Prácticas Alternativas al Uso del Fuego en la Región del Biobío. Chillán, Chile: INIA. 196 p. (Boletín INIA N° 308).
- Stone, L.R. and A.J. Schlegel. 2010. Tillage and crop rotation phase effects on soil physical properties in the west-central great plains. *Agronomy Journal*, 102: 483-491.
- Strudley, M.; T. Green and J. Ascough. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil and Tillage Research*, 99: 4-48.
- Tracy, S.; C. Black; J. Roberts and S. Mooney. 2011. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(9): 1528-1537.
- Tracy, S.; C. Black; J. Roberts; A. McNeill; R. Davidson; M. Tester; M. Samec; D. Korošak; C. Sturrock and S. Mooney. 2012. Quantifying the effect of soil compaction on three varieties of wheat (*Triticum aestivum* L.) using X-ray Micro Computed Tomography (CT). *Plant and Soil*, 353(1-2): 195-208.
- Verhulst, N.; B. Govaerts; V. Nelissen; K. Sayre; J. Crossa; D. Raes and J. Deckers. 2011. The effect of tillage, crop rotation and residue management on maize and wheat grow and development evaluated with optical sensor. *Field Crops Research*, 120: 58-67.
- Wilhelm, W. and C. Wortmann. 2004. Tillage and rotation interactions for corn and soybean grain yield as affected by precipitation and air temperature. *Agronomy Journal*, 96: 425-432.

## **CAPÍTULO II: EFECTO DE LA ROTACIÓN DE CULTIVOS Y EL SISTEMA DE LABRANZA EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO Y EL RENDIMIENTO DE TRIGO EN UN MOLLISOL DE CLIMA MEDITERRÁNEO**

### **RESUMEN**

La cero labranza provoca compactación superficial en suelos de textura fina, generando problemas mecánicos para el crecimiento de raíces. La rotación de cultivos podría aliviar estos problemas, dada la alternancia de sistemas radicales distintos y el aporte de la biomasa superficial. El objetivo del estudio fue determinar el efecto de cuatro rotaciones de cultivo (trigo-arveja, trigo-haba, trigo-raps, trigo-trigo) manejadas durante 6 años, en las propiedades físicas de un suelo y en el rendimiento de trigo en labranza convencional (CT) y cero labranza (NT). El muestreo de suelo se realizó en la fase de trigo de la rotación en junio de 2013 a profundidades de 0-15, 15-35 y 35-55 cm en CT y de 0-2, 2-5, 5-15, 15-35 y 35-55 cm en NT. Se midió densidad real, densidad aparente, porosidad total, distribución de tamaño de poros, resistencia a la penetración (RP), estabilidad de macro y microagregados y rendimiento de trigo de cinco temporadas. En CT las rotaciones no provocaron cambios en las propiedades físicas del suelo. En NT la rotación trigo-raps tuvo menor porosidad total (44,2%) en superficie y mayor RP entre los 2-5 cm profundidad, mientras que trigo-trigo tuvo el mayor porcentaje de poros de agua útil (20,1% en superficie), la menor estabilidad de microagregados (46,3% de dispersión) y la menor densidad aparente en superficie ( $1,15 \text{ Mg m}^{-3}$ ). Si bien NT presentó una mayor estabilidad de macroagregados en superficie, destaca su discontinuidad porosa independiente de la rotación usada. El sistema NT presentó los mayores rendimientos en los años más secos, en tanto en los años lluviosos se observó una disminución del rendimiento de la rotación trigo-raps y el monocultivo de trigo en cero labranza.

Palabras claves: cero labranza, compactación, rendimiento de grano



**ABSTRACT**

No till causes shallow compaction in fine textured soils, producing mechanical restrictions to root growth. Crop rotation could prevent these problems by the alternation of root systems and the superficial biomass retention as mulch. The objective of the present research was to assess the effect of four crop rotation (wheat-pea, wheat-faba bean, wheat-rapeseed and wheat-wheat) in long-term use of conventional tillage (CT) and no tillage on soil physical properties and wheat grain yield. The soil sampling was on crop rotation wheat stage in 2013 year at 3 depths for CT (0-15, 15-35 y 35-55 cm) and 5 depths for NT (0-2, 2-5, 5-15, 15-35 y 35-55), analyzing particle density, bulk density, total porosity, pore size distribution, penetration resistance, macro and micro aggregates stability and wheat yield of 5 years. The crop rotations on CT did not cause changes on soil physical properties. Meanwhile NT wheat-rapeseed rotation showed less total porosity (44.2%) on surface and high penetration resistance on 2-5 cm soil depth, while wheat-wheat rotation had the highest available water pores amount (20.1 % on surface), the less micro aggregates stability (46.3% of dispersion relationship) and the lowest bulk density on surface ( $1.15 \text{ Mg m}^{-3}$ ). NT had the highest macro aggregate stability on surface; however NT had a larger pore discontinuity than CT, within any crop rotation. NT had the highest wheat grain yields in dry years, while when years were moister, the wheat grain yield of wheat-rapeseed and wheat monoculture decreased on NT.

Keywords: no-till, soil compaction, grain yield

## INTRODUCCIÓN

La labranza convencional provoca diversos problemas físicos de suelo, derivados de las alteraciones en la estructura (Fuentes *et al.*, 2009), con cambios en las propiedades hidráulicas (Castellini y Ventrella, 2012) y mecánicas del suelo (Martínez *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2012). Uno de los principales problemas de la labranza convencional es la compactación bajo la zona de labranza, generada por el incremento en la masa y la frecuencia del paso de la maquinaria (Horn, 2003; Lipiec y Hatano, 2003; Głąb, 2007; D'Haene *et al.*, 2008; Batey, 2009). La soltura mecánica del suelo en superficie no es totalmente beneficiosa, debido a la pérdida de materia orgánica que genera una baja estabilidad y una rápida reconsolidación (Anyanzwa *et al.*, 2010). Por otra parte, la compactación que se observa debajo de la zona arada, generada por el efecto acumulado del roce de los implementos de labranza (Batey, 2009), produce restricciones mecánicas para el crecimiento de raíces y disminuye la capacidad de almacenar agua y nutrientes (Martínez *et al.*, 2008; Trükmann *et al.*, 2006).

Dados estos problemas, se han desarrollado estrategias para la conservación de suelo y el aumento de la sustentabilidad del sistema productivo, las cuales se basan en tres principios: mínima disturbación del perfil de suelo, conservación de los rastrojos en superficie, cuyo aporte de materia orgánica mantiene una mejor estructura y protege la superficie del suelo (Fuentes *et al.*, 2009) y diversificación del número de especies (Kassam y Friedrich, 2011). Esta estrategia involucra manejos agronómicos como la cero labranza y la rotación de cultivos. El uso del sistema de cero labranza conlleva diversos beneficios en el suelo, como el aumento de la materia orgánica, del agua disponible y de la fertilidad, entre otros (Fuentes *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2012; Jemai *et al.*, 2013). Sin embargo, las propiedades físicas de suelo no siempre son favorecidas por este sistema.

Algunos autores destacan efectos positivos de la cero labranza en las propiedades físicas de suelo, como una mejora en la estabilidad de agregados, una mejor infiltración y una menor resistencia a la penetración (Fuentes *et al.*, 2009; Stone y Schlegel, 2010). Por el contrario, Bhattacharyya *et al.* (2006), Martínez *et al.* (2008), Strudley *et al.* (2008), Alvarez y Steinbach (2009), Agostini *et al.* (2012) y Huang *et al.* (2012) observaron cambios negativos en la densidad aparente y la resistencia a la penetración, además de una pérdida de porosidad, especialmente de la macroporosidad. Estos cambios se asocian a problemas de compactación, los cuales dependen de la textura del suelo. Aun así, para este sistema de labranza el problema se presenta en los primeros 20 cm de suelo (Kaiser *et al.*, 2013), indistintamente de la clase textural, debido al peso de las máquinas de cero labranza (Agostini *et al.*, 2012). Esta condición de compactación genera problemas de anegamiento en periodos de alta precipitación y de sequía en los periodos de baja precipitación, además de problemas de crecimiento de raíces por una mayor impedancia mecánica (Strudley *et al.*, 2008).

En labranza convencional, no se espera que el efecto generado por el cultivo sea tan importante sobre las propiedades del suelo, debido a que la inversión y el mullimiento realizados durante la preparación de suelo son los factores con mayor influencia en las

propiedades físicas (Głab *et al.*, 2013). Al contrario, en cero labranza el efecto de las raíces de los cultivos en la rotación persiste debido a la ausencia de la preparación de suelo, siendo la raíz el principal agente que influye en la estructura, seguido por la biomasa aérea, que contribuye a la protección física superficial y genera nuevos inputs de materia orgánica (Martins *et al.*, 2009; Milleret *et al.*, 2009). Por esta razón, los cultivos dentro de una rotación pueden mejorar las propiedades físicas del suelo.

Las rotaciones de cultivos pueden generar cambios en las propiedades físicas de suelo de manera más efectiva que un monocultivo, debido a que al variar la especie se alternan diferentes sistemas radicales (Martins *et al.*, 2009; Milleret *et al.*, 2009). Cultivos con raíces fasciculadas pueden estabilizar agregados (Hallet *et al.*, 2009), en cambio aquéllos con raíces pivotantes puede generar un efecto similar a un arado o cincelado (Liu *et al.*, 2011). A su vez, las raíces al degradarse producen canales que provocan una mayor porosidad total (Huang *et al.*, 2012). En este sentido, un cultivo con mayor densidad de raíces, como el trigo, generará una mayor porosidad total (Fuentes *et al.*, 2009). Algunos cultivos como el maíz exudan mucílagos, agentes cementantes que favorecen la estructuración (Martins *et al.*, 2009; Tracy *et al.*, 2011). Otros factores que se pueden considerar son la cantidad y tipo de residuos que permanecen como fuente de materia orgánica (Anyanzwa *et al.*, 2010) y que tendrían distinto potencial de protección de la superficie del suelo (Jordán *et al.*, 2010; Mulumba y Lal, 2008). Finalmente, está la capacidad de fijar nitrógeno, como es el caso de las leguminosas, lo que un mayor crecimiento de raíces y de la parte aérea del cultivo siguiente (Bhattacharyya *et al.*, 2006; Fuentes *et al.*, 2009; Milleret *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2012). Pese a esto, autores como Katsvairo *et al.* (2002) y Madari *et al.* (2005) no han encontrado cambios en las propiedades físicas del suelo entre distintas rotaciones de cultivo en cero labranza.

En ambientes mediterráneos, son escasos los trabajos relacionados al efecto que producen las rotaciones sobre las propiedades físicas del suelo, especialmente en el sistema de cero labranza, y cómo es afectado el rendimiento de trigo. Por otra parte, se ha observado que la cero labranza tiene un mayor rendimiento que la labranza convencional en ambientes mediterráneos cuando la temporada es seca (De Vita *et al.*, 2007; Ben Moussa-Machraoui *et al.*, 2010; Morell *et al.*, 2011; Pittelkow *et al.*, 2015), en tanto se ha visto un menor rendimiento en cero labranza cuando la precipitación es muy alta (De Vita *et al.*, 2007; Shertzer, 2013).

Dada la distribución de lluvias del clima mediterráneo, los cultivos a utilizar en la rotación se acotan al grupo de las que se siembran en otoño-invierno como trigo, avena, cebada, haba, arveja y raps. De ahí que se hace necesario aportar nuevos antecedentes de la interacción entre el sistema de labranza, la rotación de cultivos y la disponibilidad de las precipitaciones, y su efecto sobre el rendimiento del trigo en condiciones de secano.

## **HIPÓTESIS**

En un ambiente de secano mediterráneo manejado en cero labranza habrá al menos una rotación de cultivos que genere cambios en propiedades físicas y el rendimiento de trigo respecto a la labranza convencional.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Determinar el efecto de distintas rotaciones de cultivos en las propiedades físicas de suelo y en el rendimiento de trigo en cero labranza y labranza convencional.

### **Objetivos Específicos**

Evaluar el efecto de cuatro rotaciones de cultivos (trigo-trigo, trigo-arveja, trigo-raps y trigo-haba) en las propiedades físicas de suelo relacionadas a compactación y estructuración en sistemas de labranza convencional y cero labranza.

Analizar el efecto de la rotación y el sistema de labranza sobre el rendimiento de trigo en un periodo de cinco años.

## MATERIALES Y MÉTODO

### Lugar de estudio

El experimento de rotaciones y sistemas de labranza fue llevado a cabo en la Estación Experimental Antumapu de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33° 34'S, 70° 38'O, 621 m.s.n.m) con información obtenida entre los años 2010 y 2014. Para el presente trabajo de tesis, el desarrollo práctico abarcó la temporada 2013-2014.

El lugar de estudio tiene un clima templado cálido mediterráneo, con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses y cuyo régimen de precipitación promedio anual es de 366 mm, mayormente concentrados en el periodo de invierno (80%). La evapotranspiración de referencia anual alcanza un valor promedio de 870 mm, la temperatura media anual es de 14,0 °C, siendo el mes más cálido enero, con una máxima promedio de 29,1 °C, y el mes más frío corresponde a julio, con mínimas promedio de 3,3 °C (Uribe *et al.*, 2012).

El estudio se estableció en un Mollisol de origen aluvial, en el cual predominan las clases texturales franca a franco arcillosa, encontrándose algunos casos en clase franco arcillo arenosa. Con un contenido de arcilla promedio del 26,3%, el limo se encontró con un promedio de 29,8%, mientras que la arena se encontró un 43,8% promedio (Apéndice 1).

El suelo pertenece a la Serie Santiago, desarrollado a partir de los sedimentos del cono aluvial del río Maipo. Suelo de color grisáceo muy oscuro en profundidad, buena permeabilidad y drenaje, sin pedregosidad superficial; es un suelo miembro de la Familia coarse loamy over sandy, skeletal, mixed, thermic de los Entic Haploxerolls, que se caracteriza por ser suelos planos de profundidad media de 60 cm (CIREN, 1996). Si bien las clases texturales francas finas se asocian a la Serie Maipo, este corresponde a un suelo profundo (CIREN, 1996), por lo que se privilegió la alta pedregosidad a partir de los 60 cm en el sitio de estudio para asociarlo a la Serie Santiago.

En cuanto a la materia orgánica, Cerda (2015) midió los contenidos en el mismo sitio del ensayo en cada sistema de labranza. En dicho estudio, realizado el año 2012, se observó que el contenido de materia orgánica en cero labranza previo a la siembra fue de 4,34% entre los 0-5 cm, 3,12% entre los 5-15 cm y 2,07% entre los 15-30 cm, observando una estratificación de materia orgánica en este sistema, efecto que se mantuvo hasta el estado de espigadura. En cuanto a la labranza convencional, se observó una distribución más uniforme de la materia orgánica, encontrándose valores de 2,56% entre los 0-5 cm, 2,07% entre los 5-15 cm y 2,45% entre los 15-30 cm, también al momento previo a la siembra de trigo.

## Historial del suelo

Antes de este ensayo, entre los años 1998 y 2007, el lugar de estudio tuvo dos ensayos comparativos de los sistemas de cero labranza y labranza convencional, con una sola rotación: trigo – maíz. A partir del año 2008 se establecieron las rotaciones que constituyen los tratamientos del presente estudio.

### Tratamientos, diseño del experimento y labores culturales

Los tratamientos del ensayo correspondieron a tres rotaciones de cultivos, los cuales se rotaron con un cultivo de trigo candeal, más un monocultivo de trigo (Cuadro 1).

Cuadro 1. Tratamientos del ensayo (n=4)

<b>Tratamiento</b>	<b>Abreviación</b>	<b>Rotaciones</b>
<b>1</b>	AR	Trigo-Arveja
<b>2</b>	HA	Trigo-Haba
<b>3</b>	RA	Trigo-Raps
<b>4</b>	T	Trigo-Trigo

Los tratamientos se dispusieron en un diseño de bloques completos al azar, considerando cuatro repeticiones por cada tratamiento. La unidad experimental correspondió a una parcela de trigo candeal de 5,5 m de ancho y 10 m de largo. Estas fueron establecidas bajo dos ensayos independientes (cero labranza y labranza convencional). Se presentaron los mismos tratamientos para los dos sistemas de labranza. Si bien el tratamiento 4 corresponde a un monocultivo, de aquí en adelante se hablará indistintamente de rotaciones.

Las cuatro rotaciones estuvieron presentes desde el año 2008, considerando datos de rendimiento desde el año 2010 hasta el año 2014. El experimento se duplicó para que cada fase de la rotación estuviera presente todos los años y de esta manera tener 5 años de rendimiento de la fase de trigo. Para el presente estudio, las evaluaciones de suelo se realizaron en las respectivas parcelas con trigo.

Los ensayos fueron sembrados entre los meses de mayo y junio con trigo candeal variedad Llaleta, considerando una dosis de semillas de 220 kg ha<sup>-1</sup> con una distancia entre hilera de 20 cm. La preparación de suelo para labranza convencional correspondió a un arado de vertedera y dos a tres rastros dependiendo de la temporada; los rastros fueron picados y luego incorporados en el suelo. En la superficie de cero labranza no hubo labores de preparación de suelo, los rastros se picaron y se mantuvieron sobre la superficie del suelo en las distintas parcelas. La siembra fue realizada con una máquina sembradora marca SEMEATO SHM13/15 (São Cristóvão, RS, Brasil). Ambos ensayos estuvieron en una condición de secano.

La fertilización de las parcelas consistió en 120 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup> a la siembra como superfosfato triple. Los ensayos no se fertilizaron con nitrógeno, para evaluar el efecto de las leguminosas en el rendimiento de trigo.

En cero labranza, antes de las siembras, las malezas fueron controladas con glifosato. En labranza convencional, las malezas fueron controladas con el último rastraje. Se realizó un control de malezas, plagas y enfermedades en ambos sistemas, cuando este fue necesario, considerando un programa de aplicaciones de agroquímicos, de manera de mantener al cultivo libre de malezas, plagas y enfermedades.

### Mediciones de suelo

Las muestras para las propiedades físicas de suelo se obtuvieron en la temporada 2013 en las unidades experimentales presentes en la fase de trigo de las rotaciones, cuando el cultivo estaba en el estado de segunda a tercera hoja.

Se realizaron muestreos a distintas profundidades de suelo. Para la labranza convencional se consideraron las siguientes profundidades: 0 – 15 cm, 15 – 35 cm y 35 – 55 cm. En el caso de la cero labranza las profundidades fueron: 0 – 2 cm, 2 – 5 cm, 5 – 15 cm, 15 – 35 cm y 35 – 55 cm. La separación en el sistema de cero labranza de los primeros 15 cm de suelo se debió a la estratificación del perfil que ocurre bajo este sistema. Para la comparación de los sistemas de labranza, con excepción de la resistencia a la penetración, se repitió el valor de la variable medida entre los 0-15 cm de profundidad de la labranza convencional, asumiendo que el valor en esa estrata es homogéneo por la preparación de suelo.

La densidad aparente se determinó por el método del cilindro (Sandoval *et al.*, 2012), para el caso de la cero labranza se utilizaron cilindros de 2, 3 y 5 cm de altura y para la labranza convencional se utilizaron cilindros de 5 cm de altura, todos con un diámetro de 5,9 cm, tomando una muestra por parcela y profundidad.

La densidad real se determinó con el método del picnómetro (Sandoval *et al.*, 2012), en el cual se tomó una muestra por parcela y profundidad, la cual se tamizó a 2 mm. Con estas dos propiedades de suelo se calculó la porosidad total del suelo ( $n$ ) utilizando la siguiente ecuación:

$$n = 1 - \frac{D_a}{D_r} \quad (\text{Ec. 1})$$

donde  $D_a$  corresponde a la densidad aparente y  $D_r$  a la densidad real.

La resistencia a la penetración se realizó con un penetrológico (Eijkelkamp, Holanda) de punta cónica con el suelo cercano a capacidad de campo (24 h después de una lluvia); el equipo realiza mediciones cada 1 cm de profundidad, lo que permitió promediar las lecturas según la profundidades de muestreo y cada 10 cm bajo los 15 cm de profundidad. Esta

medición se realizó en el estado de segunda a tercera hoja, efectuando cuatro mediciones por unidad experimental.

Se clasificaron los poros con los datos de la curva de retención de agua del suelo. Para esto se determinaron los poros de agua no disponible para la planta (PUW, según el acrónimo en inglés de pores of unavailable water, potencial mátrico de -1500 kPa), poros de agua disponible (PAW según el acrónimo en inglés de pores of available water, retención de agua entre los potenciales mátricos de -1500 y -33 kPa), poros de drenaje lento (SDP según el acrónimo en inglés de slow drainage pores, retención de agua entre los potenciales mátricos de -33 y -6 kPa), y poros de drenaje rápido (FDP según el acrónimo en inglés de fast drainage pores, potencial mátrico mayor a -6 kPa) (Hartge y Horn, 2009). Cada muestra se saturó por la base del cilindro y luego se equilibró sucesivamente a potenciales mátricos de -0,2 y -6 kPa en una cama de arena y a -33 y -1500 kPa en ollas de presión (Sandoval *et al.*, 2012).

La estabilidad de los macroagregados se realizó por el método del tamizado en seco y en húmedo (Hartge y Horn, 2009), pasando las muestras secas al aire por tamices de distintos tamaños, pesando el contenido de suelo retenido en cada tamiz. Posteriormente se realizó el mismo tamizaje pero esta vez sumergido en un recipiente con agua, pesando el contenido de cada tamiz luego de ser secado a 105°C. Con las fracciones relativas de cada tamiz en relación a la muestra total, corregida por su contenido de agua, se calculó la variación del diámetro medio de agregados (VDMA), de acuerdo a Hartge y Horn (2009). Para este análisis se consideró una muestra por parcela y profundidad.

La estabilidad de los microagregados se determinó por el método de la relación de dispersión, midiendo la dispersión de limos y arcillas por acción de agua destilada en relación al limo y arcilla total de una muestra de agregados de entre 1 y 2 mm. El detalle del método se encuentra en Seguel *et al.* (2003).

### **Mediciones del cultivo**

Estas mediciones se realizaron todas las temporadas, desde el año 2010 hasta el 2014.

Para la estimación del establecimiento se contó el número de plantas por metro lineal, lo cual se repitió tres veces en cada parcela de trigo. También se contó con datos de tiempo requerido para alcanzar diversos estados fenológicos, emergencia, primera, segunda y tercera hoja, primer nudo, espigadura y madurez fisiológica, estados que se basan en la escala de Zadoks *et al.* (1974). El criterio a usar al momento del muestreo fue que el 50% del cultivo estuviese en el estado respectivo.

Se determinaron los rendimientos y sus componentes, para esto se cosechó 1 m<sup>2</sup>, lo cual se repitió tres veces en cada parcela de trigo. Luego, en el metro cuadrado cosechado se separaron 50 tallos con espigas, a los que se les determinó la masa en húmedo y seco después de ser secados en una estufa de aire forzado durante 48 h a 70 °C.



El material cosechado restante de cada metro cuadrado se trilló con una máquina trilladora estacionaria, posteriormente se pesaron los granos y se separan 250 granos, los cuales se pesaron antes y después de ser secados en estufa de aire forzado durante 48 h a 70 °C.

Con los datos obtenidos se determinó el rendimiento y la biomasa aérea, el número de granos por metro cuadrado, el peso de los mil granos (PS1000), las espigas por metro cuadrado y los granos por espiga. La información se expresó con un 0% de contenido de agua. Para determinar el índice de cosecha se dividió el rendimiento en grano por la biomasa aérea producida.

### **Datos climáticos**

Se obtuvieron los datos climáticos de temperaturas mínimas y máximas diarias, radiación solar y precipitación diaria desde la estación meteorológica ubicada en la Estación Experimental La Platina durante todos los años del ensayo.

### **Análisis estadístico**

Se verificó el cumplimiento de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza. Posteriormente se realizó un análisis combinado de varianza de dos factores (sistema de labranza y rotaciones) para las mediciones de suelo, y un análisis combinado de varianza de tres factores (sistema de labranza, rotaciones y año) para los análisis de rendimientos. A su vez, se realizó un análisis combinado de varianza anidando la profundidad al bloque para establecer si existen diferencias en profundidad, presentando la información obtenida para densidad aparente y los poros de drenaje rápido. Se realizaron comparaciones con la prueba DGC cuando se encontraron diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

Con el fin de explicar la relación entre las propiedades físicas de suelo y el rendimiento de los años que se encontraron diferencias entre los rendimientos, se realizó un análisis de componentes principales (ACP), que consistió en construir variables no observables (componentes) a partir de variables observables (las variables a analizar). Las nuevas variables (componentes principales) fueron obtenidas como combinaciones lineales de las variables originales y fueron representadas en un Biplot (Balzarini *et al.*, 2005). Se utilizó un promedio ponderado según la profundidad para las propiedades físicas de suelo, utilizando los primeros 15 cm de suelo, estrata en donde se observaron las mayores diferencias.

También se realizó una regresión con mínimos cuadrados parciales (PLS), este método relaciona los efectos de la interacción del sistema de labranza con las rotaciones como variables dependientes (Y) a variables ambientales como variables explicatorias (X) (Balzarini *et al.*, 2005). Se realizó un gráfico triplot para explicar la interacción del sistema de labranza con las rotaciones para el rendimiento en función de la precipitación entre distintos estados de desarrollo y los días grados entre siembra y madurez fisiológica.

## RESULTADOS

### Propiedades físicas de suelo

#### Densidad real

La densidad real presentó valores en un rango entre 2,53 y 2,76 Mg m<sup>-3</sup>. No se observaron diferencias entre las rotaciones de cultivo, como tampoco interacción rotación con sistema de labranza. Solo se observaron diferencias entre los sistemas bajo los 15 cm de profundidad, observando los menores valores de densidad real en labranza convencional (Cuadro 2).

Cuadro 2. Efecto de la rotación de cultivos en la densidad real en los sistemas de cero labranza y labranza convencional (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	Densidad real (Mg m <sup>-3</sup> )				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	2,64	2,57	2,55	2,63	<b>2,59</b> ns
	NT	2,61	2,65	2,55	2,54	<b>2,58</b> ns
2-5 cm	CT	2,64	2,57	2,55	2,63	<b>2,59</b> ns
	NT	2,62	2,65	2,58	2,62	<b>2,62</b> ns
5-15 cm	CT	2,64	2,57	2,55	2,63	<b>2,59</b> ns
	NT	2,62	2,65	2,60	2,67	<b>2,63</b> ns
15-35 cm	CT	2,59	2,60	2,53	2,65	<b>2,59</b> B
	NT	2,72	2,69	2,64	2,76	<b>2,70</b> A
35-55 cm	CT	2,64	2,58	2,61	2,63	<b>2,61</b> B
	NT	2,66	2,74	2,69	2,71	<b>2,70</b> A

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

#### Densidad aparente

La densidad aparente fluctuó entre 1,15 y 1,58 Mg m<sup>-3</sup> (Cuadro 3). La densidad aparente de 0-2 cm tuvo interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones de cultivo. En esta profundidad se observó una menor densidad aparente en el sistema de cero labranza, exceptuando la rotación trigo-raps, que tuvo una mayor densidad aparente en relación al resto de las rotaciones en cero labranza.

En las siguientes dos profundidades (2-5 cm y 5-15 cm) no hubo interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones, tampoco hubo efecto de la rotación de cultivos, encontrando diferencias sólo a nivel de sistemas de labranza, observando una mayor densidad aparente en cero labranza. También se observó que entre 2 y 5 cm de profundidad las rotaciones con leguminosas en cero labranza tienden a una menor densidad aparente. Finalmente no se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de labranza bajos los 15 cm de profundidad.

Cuadro 3. Efecto de la rotación de cultivos en la densidad aparente en los sistemas de cero labranza y labranza convencional (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	Densidad aparente (Mg m <sup>-3</sup> )				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	1,38 A	1,24 B	1,34 A	1,34 A	<b>1,33</b>
	NT	1,22 B	1,26 B	1,43 A	1,15 B	<b>1,27</b>
2-5 cm	CT	1,38	1,24	1,34	1,34	<b>1,33</b> B
	NT	1,32	1,31	1,48	1,39	<b>1,38</b> A
5-15 cm	CT	1,38	1,24	1,34	1,34	<b>1,33</b> B
	NT	1,50	1,47	1,50	1,52	<b>1,50</b> A
15-35 cm	CT	1,46	1,47	1,48	1,47	<b>1,47</b> ns
	NT	1,47	1,45	1,50	1,58	<b>1,50</b> ns
35-55 cm	CT	1,41	1,46	1,45	1,50	<b>1,46</b> ns
	NT	1,34	1,39	1,35	1,47	<b>1,39</b> ns

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Porosidad total

La porosidad total tuvo valores entre 42,0 y 54,8% (Cuadro 4). Al igual que con la densidad aparente, solo se encontró interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones en la superficie del perfil (0-2 cm), observándose mayor porosidad en cero labranza, a excepción de la rotación de trigo-raps, que tuvo la menor porosidad total en este sistema de labranza y el mayor valor en labranza convencional. En la profundidad siguiente (2-5 cm) no se encontraron diferencias significativas, sin embargo se mantuvo la tendencia de una menor porosidad en la rotación de trigo-raps en cero labranza.

Entre los 5 y 15 cm de profundidad se observó menor porcentaje de poros totales en cero labranza (42,9%) significativamente menor al 48,8% de la labranza convencional. Finalmente, bajo los 15 cm de profundidad no se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de labranza ni en las rotaciones de cultivos.

Cuadro 4. Efecto de la rotación de cultivos en la porosidad total en los sistemas de cero labranza y labranza convencional (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	Porosidad total (%)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	47,3 B	47,8 B	51,3 A	48,8 B	<b>48,8</b>
	NT	53,5 A	52,5 A	43,8 B	54,8 A	<b>51,1</b>
2-5 cm	CT	47,3	47,8	51,3	48,8	<b>48,8</b> ns
	NT	49,3	50,8	42,5	47,0	<b>47,4</b> ns
5-15 cm	CT	47,3	47,8	51,3	48,8	<b>48,8</b> A
	NT	42,3	44,5	42,3	42,8	<b>42,9</b> B
15-35 cm	CT	44,0	43,3	42,0	44,5	<b>43,4</b> ns
	NT	46,3	46,3	42,5	43,0	<b>44,5</b> ns
35-55 cm	CT	46,8	43,5	44,0	43,0	<b>44,3</b> ns
	NT	49,3	49,5	49,8	45,3	<b>48,4</b> ns

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Poros de drenaje rápido

En los poros de drenaje rápido ( $> 50 \mu\text{m}$ ) se observó un rango de entre 6,9 y 32,4 % (Cuadro 5); esta gran diferencia de poros de aireación principalmente ocurre en el sistema de cero labranza. No hubo interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones, tampoco hubo efecto de las rotaciones de cultivos; sin embargo, se observó que las rotaciones de trigo-arveja (0-2 cm) y trigo-haba (2-5 cm) en cero labranza tienden a una mayor cantidad de poros de drenaje rápido, en comparación al resto de los tratamientos.

En cero labranza se observó una abundante cantidad de poros de drenaje rápido en los primeros dos centímetros de profundidad, con un promedio de 28% de macroporos, en cambio en labranza convencional los macroporos alcanzaron un promedio de 16%. Además se observó en cero labranza una estratificación de los poros gruesos, con una disminución en los primeros 15 cm de profundidad, hasta alcanzar un valor promedio de 8,5% en la estrata de 5-15 cm, el cual fue significativamente menor al sistema de labranza convencional, que casi duplicó este valor.

Cuadro 5. Poros de drenaje rápido (PDR) en profundidad, para labranza convencional y cero labranza (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	PDR (%)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	16,4	17,1	15,1	15,0	<b>15,9</b> B
	NT	32,4	28,5	24,6	27,0	<b>28,1</b> A
2-5 cm	CT	16,4	17,1	15,1	15,0	<b>15,9</b> ns
	NT	16,2	18,2	14,6	16,2	<b>16,3</b> ns
5-15 cm	CT	16,4	17,1	15,1	15,0	<b>15,9</b> A
	NT	8,9	8,5	9,6	6,9	<b>8,5</b> B
15-35 cm	CT	11,2	12,2	14,4	12,8	<b>12,6</b> ns
	NT	11,2	9,9	11,4	9,1	<b>10,4</b> ns
35-55 cm	CT	11,5	8,7	10,3	14,2	<b>11,2</b> ns
	NT	13,6	9,6	12,6	9,9	<b>11,4</b> ns

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Poros de drenaje lento

Estos poros (10-50  $\mu\text{m}$ ) se encontraron en una menor proporción al resto de las otras clasificaciones, observándose valores entre 2,4 y 6,1 % (Cuadro 6). En esta clasificación de poros no existe interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones ni efecto de las rotaciones. Solo se encontró diferencias significativas entre los sistemas de labranza entre 5-15 cm de profundidad, con la mayor cantidad de poros de drenaje lento en la labranza convencional (5,5%), en cambio la cero labranza alcanzó un mínimo de 3,6%. Si bien no se encontraron diferencias entre las rotaciones, se apreció que las rotaciones con leguminosas permiten mantener una mayor cantidad de poros de drenaje lento en superficie (0-5 cm) en cero labranza y en el monocultivo de trigo (0-15 cm) en labranza convencional.

Cuadro 6. Poros de drenaje lento (PDL) en profundidad, para labranza convencional y cero labranza (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	PDL (%)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	4,7	5,4	5,6	6,1	<b>5,5</b> ns
	NT	5,4	6,1	4,5	3,4	<b>4,8</b> ns
2-5 cm	CT	4,7	5,4	5,6	6,1	<b>5,5</b> ns
	NT	6,1	4,3	4,4	2,6	<b>4,3</b> ns
5-15 cm	CT	4,7	5,4	5,6	6,1	<b>5,5</b> A
	NT	4,3	3,5	4,0	2,4	<b>3,6</b> B
15-35 cm	CT	3,9	3,7	4,2	3,2	<b>3,7</b> ns
	NT	4,3	4,4	4,8	3,4	<b>4,2</b> ns
35-55 cm	CT	5,4	3,9	4,4	4,5	<b>4,5</b> ns
	NT	3,9	4,1	4,2	2,5	<b>3,7</b> ns

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Poros de agua útil

Los poros de agua útil (0,2-10  $\mu$ m) tuvieron valores que fluctuaron entre los 9,8 y 20,1% (Cuadro 7). Entre los 0-2 cm de profundidad se encontró interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones; en este caso, la mayor cantidad de poros de agua útil se observó en el monocultivo de trigo bajo cero labranza (20,1%). En los siguientes tres estratos no se encontró interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones ni diferencias significativas entre los sistemas de labranza.

Entre los 35 y 55 cm de profundidad de suelo se encontró interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones. En esta profundidad se agruparon las rotaciones trigo-raps, trigo-arveja y el monocultivo de trigo en cero labranza, junto con la rotación de trigo-haba en labranza convencional, como los tratamientos con el mayor porcentaje de poros de agua útil (>13%), dejando al resto de los tratamientos con niveles de agua aprovechable inferiores al 11%.

Cuadro 7. Poros de agua útil (PAU) en profundidad, para labranza convencional y cero labranza (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	PAU (%)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	13,0 B	13,4 B	12,1 B	13,2 B	<b>12,9</b>
	NT	13,9 B	14,3 B	15,9 B	20,1 A	<b>16,0</b>
2-5 cm	CT	13,0	13,4	12,1	13,2	<b>12,9</b> ns
	NT	11,7	10,0	11,9	15,2	<b>12,2</b> ns
5-15 cm	CT	13,0	13,4	12,1	13,2	<b>12,9</b> ns
	NT	11,6	12,5	12,1	14,2	<b>12,6</b> ns
15-35 cm	CT	12,5	13,2	12,2	10,9	<b>12,2</b> ns
	NT	12,8	12,5	14,4	13,0	<b>13,2</b> ns
35-55 cm	CT	10,5 B	13,9 A	10,7 B	9,8 B	<b>11,2</b>
	NT	16,0 A	10,8 B	16,2 A	12,6 A	<b>13,9</b>

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Poros de agua no utilizable

En esta última clasificación se consideraron poros con un diámetro menor a los 0,2  $\mu\text{m}$ , observándose valores entre 11,2 y 17,6% (Cuadro 8). No hubo interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones, tampoco hubo efecto de las rotaciones. Sólo se encontraron diferencias significativas entre los sistemas de labranza entre los 0-5 cm de profundidad. En este sentido, se observó una mayor cantidad de poros de agua no utilizable en cero labranza con respecto a la labranza convencional. Si bien no se encontraron diferencias entre las rotaciones en cero labranza, el monocultivo de trigo permitió disminuir la cantidad de estos poros en esta estrata.

Cuadro 8. Poros de agua no utilizable (PAI) en profundidad, para labranza convencional y cero labranza (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	PAI (%)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	12,2	12,4	12,7	14,1	<b>12,9</b> B
	NT	15,9	16,3	17,5	13,8	<b>15,8</b> A
2-5 cm	CT	12,2	12,4	12,7	14,1	<b>12,9</b> B
	NT	16,3	17,6	17,6	15,3	<b>16,7</b> A
5-15 cm	CT	12,2	12,4	12,7	14,1	<b>12,9</b> ns
	NT	14,4	14,9	14,4	15,4	<b>14,7</b> ns
15-35 cm	CT	15,3	14,4	12,2	14,1	<b>14,0</b> ns
	NT	13,3	14,3	12,5	14,1	<b>13,5</b> ns
35-55 cm	CT	12,6	13,8	12,5	13,8	<b>13,2</b> ns
	NT	13,4	17,1	11,2	16,3	<b>14,5</b> ns

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Resistencia a la penetración

No se observó interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones, ni diferencias significativas entre las rotaciones y los sistemas en los 0-2 cm de profundidad (Cuadro 9).

Hubo interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones entre 2-15 cm de profundidad y entre 35-55 cm de profundidad. Entre 2-15 cm de profundidad la rotación de cultivos en labranza convencional no provocó diferencias en la resistencia a la penetración, mientras que en cero labranza la rotación trigo-raps tuvo una mayor resistencia a la penetración que las otras rotaciones. Entre los 35-55 cm la rotación de cultivos en cero labranza no provocó diferencia en la resistencia a la penetración, mientras que en labranza convencional la resistencia a la penetración fue similar a cero labranza, a excepción de las rotaciones trigo-haba y trigo-raps, donde se observaron mayores valores.

Entre los 15-35 cm de profundidad se pierde el efecto realizado por las rotaciones, observándose sólo diferencias a nivel de sistemas de labranza. Se encontró una mayor resistencia a la penetración en cero labranza en comparación con la labranza convencional entre los 15 y 25 cm; en la siguiente estrata (25 a 35 cm de profundidad) se observó un efecto contrario, con una resistencia a la penetración mayor en labranza convencional que en cero labranza, condición que se mantuvo a mayor profundidad.



Cuadro 9. Resistencia a la penetración (RP) en profundidad, para labranza convencional y cero labranza (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	RP (kPa)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	397	358	435	306	<b>374</b> ns
	NT	576	329	738	463	<b>526</b> ns
2-5 cm	CT	568 C	564 C	591 C	437 C	<b>540</b>
	NT	1482 B	1236 B	2110 A	1217 B	<b>1511</b>
5-15 cm	CT	791 C	813 C	804 C	717 C	<b>781</b>
	NT	2505 B	2570 B	3214 A	2171 B	<b>2615</b>
15-25 cm	CT	1780	1974	1921	1837	<b>1878</b> B
	NT	3001	3572	3127	2625	<b>3081</b> A
25-35 cm	CT	4275	4202	4334	3847	<b>4165</b> A
	NT	3777	3601	2814	3040	<b>3308</b> B
35-45 cm	CT	4986 B	6390 A	6845 A	5398 B	<b>5905</b>
	NT	4741 B	3985 B	3823 B	4515 B	<b>4266</b>
45-55 cm	CT	5474 B	7671 A	6996 A	6272 B	<b>6603</b>
	NT	5565 B	4246 B	4611 B	5817 B	<b>5060</b>

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Estabilidad de macroagregados

En el Cuadro 10 se observan los resultados de la prueba de la variación del diámetro medio de los agregados (VDMA), la cual indica la dispersión en agua de los macroagregados; en este sentido, una mayor VDMA indica una menor estabilidad de los agregados. No existió interacción entre las rotaciones de cultivo y los sistemas de labranza para la VDMA. Sólo se observaron diferencias significativas entre los sistemas de labranza entre 0-5 cm y 15-35 cm de profundidad.

En los primeros cinco centímetros de profundidad, se encontró que la mayor VDMA ocurrió en labranza convencional, siendo mayor a 7 mm en todas las rotaciones. Esto indica que los agregados son menos estables en este sistema en comparación a los agregados en cero labranza, en el cual se obtuvo una variación de diámetro medio de los agregados de entre 3,63 y 5,89 mm, versus 8,18 mm de la labranza convencional.

Las diferencias estadísticas significativas entre sistemas de labranza se pierden entre los 5 y los 15 cm de profundidad. En este horizonte se observó una disminución en la estabilidad de los macroagregados en el sistema de cero labranza, al obtenerse un valor promedio de VDMA de 8,43 mm, sin diferencias con la labranza convencional.

Entre los 15 y 35 cm de profundidad se observó un nuevo incremento en la VDMA en el sistema de cero labranza, llegando a valores de 9,60 mm, significativamente mayor al de labranza convencional. En el último estrato, la VDMA de la cero labranza disminuyó ligeramente, desapareciendo las diferencias estadísticas significativas con respecto al sistema de labranza convencional.

Cuadro 10. Variación del diámetro medio de los agregados (VDMA) en profundidad, para labranza convencional y cero labranza (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	VDMA (mm)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	7,38	8,72	8,09	8,51	<b>8,18</b> A
	NT	4,62	4,91	3,63	5,04	<b>4,55</b> B
2-5 cm	CT	7,38	8,72	8,09	8,51	<b>8,18</b> A
	NT	4,76	5,89	5,17	4,50	<b>5,08</b> B
5-15 cm	CT	7,38	8,72	8,09	8,51	<b>8,18</b> ns
	NT	10,05	7,36	8,04	8,25	<b>8,43</b> ns
15-35 cm	CT	9,01	7,58	9,32	9,71	<b>8,91</b> B
	NT	9,50	8,82	11,38	8,71	<b>9,60</b> A
35-55 cm	CT	7,90	9,65	7,63	8,00	<b>8,30</b> ns
	NT	8,04	7,23	9,51	7,22	<b>8,00</b> ns

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Estabilidad de microagregados

Al igual que la VDMA, la estabilidad de los microagregados se estudió con una prueba de dispersión, en donde los valores más altos corresponden a una mayor dispersión de agregados, por ende a una menor estabilidad (Cuadro 11).

Se observó interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones solo en los 5-15cm de profundidad de suelo. En labranza convencional las rotaciones de cultivos no provocaron cambios en la estabilidad de microagregados, mientras que en cero labranza la menor estabilidad de microagregados (mayor relación de dispersión) se observó en el monocultivo de trigo.

En el resto de las estratas no se observó interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones, observándose solamente efecto de los sistemas de labranza. En este sentido, la mayor estabilidad de microagregados ocurrió en cero labranza en comparación a la labranza convencional.

Cuadro 11. Relación de dispersión de microagregados en profundidad, para labranza convencional y cero labranza (n=4).

Profundidad	Sistema de labranza	Relación de Dispersión (%)				Promedio sistemas de labranza
		AR	HA	RA	T	
0-2 cm	CT	71,3	67,7	66,4	66,0	<b>67,8</b> A
	NT	49,7	49,8	39,7	50,0	<b>47,3</b> B
2-5 cm	CT	71,3	67,7	66,4	66,0	<b>67,8</b> A
	NT	40,7	39,6	36,6	44,8	<b>40,4</b> B
5-15 cm	CT	71,3 A	67,7 A	66,4 A	66,0 A	<b>67,8</b>
	NT	40,5 C	41,0 C	46,8 C	56,5 B	<b>46,2</b>
15-35 cm	CT	70,8	72,6	70,4	63,9	<b>69,4</b> A
	NT	39,0	38,7	37,9	35,4	<b>37,7</b> B
35-55 cm	CT	52,2	53,2	49,2	56,1	<b>52,7</b> A
	NT	28,0	38,4	30,1	33,7	<b>32,5</b> B

Letras mayúsculas distintas en cada profundidad muestran diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.

### Datos climáticos

En este ensayo, la variable climática más importante fue la precipitación, debido a que el estudio se realizó en secano. Los montos precipitados en los meses de crecimiento del cultivo de trigo y el porcentaje de precipitaciones que ocurrió en distintas fases de desarrollo se observan en el Cuadro 12. Las otras variables climáticas se presentan en los anexos 1 al 5, en tanto la cantidad de días entre cada estado se presenta en el Apéndice 2.

Cuadro 12. Monto de precipitaciones durante el crecimiento del cultivo de trigo en sus distintos estados de desarrollo para los cinco años del estudio.

Periodo	Precipitaciones (mm)				
	2010	2011	2012	2013	2014
mayo	24	0	-	84	0
junio	75	38	88	9	89
julio	26	35	6	3	38
agosto	8	34	40	35	59
septiembre	23	16	47	6	28
octubre	10	91	42	0	0
noviembre	34	0	0	0	0
total	200	215	223	137	214
siembra- 3° Hoja	99	39	94	92	93
3°hoja- PN	33	33	0	2	34
PN-espigadura	24	52	87	43	86
espigadura-MF	44	92	42	0	1
Ciclo completo	200	215	223	137	214

Siembra del cultivo del año 2012 se realizó en junio, por lo cual no se presentan las precipitaciones del mes anterior. PN: Primer nudo; MF: Madurez fisiológica.

La cantidad de agua precipitada durante el periodo del cultivo fue similar entre los años, a excepción del año 2013, el cual tuvo una precipitación de 137 mm. En cuanto a la distribución, se observó que en todos los años, a excepción del 2011, llovió sobre 90 mm entre la siembra y la aparición de la tercera hoja. Entre tercera hoja y primer nudo precipitó alrededor de 33 mm, exceptuando los años 2012 y 2013, en los cuales la precipitación fue 0 y 2 mm respectivamente. Los años 2012 y 2014 tuvieron las mayores precipitaciones entre primer nudo y espigadura (86 mm), mientras que el resto de los años precipitó menos de 53 mm. En el periodo post espigadura se observó la mayor precipitación el año 2011 (92 mm), mientras que el 2013 no llovió en este periodo y el 2014 sólo precipitó 1 mm.

### Rendimiento de trigo y sus componentes

En el Cuadro 13 se observa el rendimiento, la biomasa y los componentes de rendimiento de trigo para los dos sistemas de labranza en los cinco años del ensayo. Existió interacción del año con el sistema de labranza para todas las variables del cultivo.

Cuadro 13. Efecto de la interacción año/sistema de labranza en el rendimiento de trigo, los componentes de rendimiento y el establecimiento (n=4).

Año/SL	Rto. (kg ha <sup>-1</sup> )	Biomasa (kg ha <sup>-1</sup> )	IC -	granos m <sup>-2</sup> -	PS 1000 (g)	Granos esp <sup>-1</sup> -	esp m <sup>-2</sup> -	Estab (plantas m <sup>-2</sup> )
2010 CT	1978 B	7917 C	0,25 B	5103 C	38,4 C	15,7 B	334 B	206 C
2010 NT	2188 B	7034 C	0,32 A	4399 C	50,1 A	18,2 B	256 C	186 D
2011 CT	2965 A	12363 A	0,24 B	7618 A	39,3 C	17,3 B	436 A	233 B
2011 NT	2942 A	9748 B	0,31 A	7347 A	40,6 C	21,4 A	354 B	257 B
2012 CT	2913 A	12425 A	0,23 B	6466 B	45,2 B	17,5 B	378 B	249 B
2012 NT	2404 B	9006 B	0,26 B	5993 B	41,3 C	21,9 A	268 C	213 C
2013 CT	563 D	6773 C	0,08 D	1744 E	30,1 E	4,1 D	430 A	284 A
2013 NT	1227 C	6251 C	0,20 C	3575 D	34,3 D	12,9 C	292 C	150 E
2014 CT	1520 C	9221 B	0,17 C	5161 C	30,0 E	12,9 C	423 A	176 D
2014 NT	1488 C	6831 C	0,22 B	4687 C	32,9 D	19,8 A	251 C	102 F
Año	***	***	***	***	***	***	***	***
SL	ns	***	***	ns	***	***	***	***
SL*año	***	***	***	***	***	**	*	***

Letras mayúsculas distintas en el sentido vertical muestran diferencias significativas según prueba DGC. \*significativo  $p < 0,1$ ; \*\* significativo  $p < 0,05$ ; \*\*\* significativo  $p < 0,01$ ; ns: no significativo. CT: labranza convencional; NT: cero labranza; IC: Índice de cosecha; PS1000: peso de mil grano; esp: espigas; Estab: establecimiento; Rto.: Rendimiento; SL: sistema de labranza.

En general no hubo diferencias en rendimiento entre labranza convencional y cero labranza, excepto el año 2012, donde fue mayor en labranza convencional y el año 2013, donde el rendimiento fue mayor en cero labranza. En cuanto a la biomasa, esta fue mayor en la labranza convencional, excepto los años 2010 y 2013, donde no hubo diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas de labranza. Esto se tradujo en que el índice de cosecha fue mayor en cero labranza todos los años, exceptuando el año 2012, donde no hubo diferencias estadísticamente significativas.

No se observaron diferencias significativas entre los sistemas de labranza en el número de granos por metro cuadrado; solo en el año 2013 se observó una menor cantidad de granos por metro cuadrado en el sistema de labranza convencional. El peso de los granos fue mayor en cero labranza, exceptuando el año 2012, en el cual fue mayor el peso de los granos en labranza convencional y el año 2011, donde no se encontraron diferencias significativas entre los sistemas. El número de granos por espiga fue mayor en cero

labranza, a excepción del año 2010, en el cual no se observaron diferencias significativas entre los sistemas de labranza. Finalmente el número de espigas y el establecimiento fue mayor en labranza convencional, exceptuando el establecimiento del año 2011, en el cual no se observaron diferencias significativas.

### Efecto de la rotación de cultivos en el rendimiento y sus componentes

Se analizó la interacción entre los sistemas de labranza y la rotación de cultivo para el rendimiento de trigo y los componentes más importantes. Esta interacción se realizó para cada año por separado.

Se observó efecto de las rotaciones de cultivos para el rendimiento solo en el año 2012 (Cuadro 14), en el cual se observó un menor rendimiento de trigo en las rotación trigo-raps y el monocultivo en cero labranza. En el año 2013, los mejores rendimientos se alcanzaron en cero labranza, independiente de la rotación realizada; estas medias fueron distintas estadísticamente a las que ocurrieron en labranza convencional, que obtuvo los menores rendimientos.

Cuadro 14. Rendimiento promedio del cultivo de trigo de las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )					
		2010	2011	2012	2013	2014	Total
CT	AR	2028 A	2922 A	2884 A	599 B	1342 A	1955
	HA	2176 A	2733 A	3113 A	250 B	1714 A	1997
	RA	1950 A	3182 A	2565 A	587 B	1474 A	1951
	T	1760 A	3024 A	3088 A	815 B	1551 A	2048
NT	AR	1980 A	2925 A	3076 A	1155 A	1675 A	2162
	HA	2163 A	2996 A	2830 A	1437 A	1581 A	2201
	RA	2242 A	2615 A	1599 B	1300 A	1421 A	1835
	T	2368 A	3231 A	2112 B	1015 A	1277 A	2001

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

En el Cuadro 15 se observa que los años 2010 y 2014 no se observó interacción entre las rotaciones y los sistema de labranza para la biomasa, en cambio en los otros tres años del estudio sí se observó esta interacción. La biomasa disminuyó en las tres rotaciones realizadas en cero labranza para el año 2011; al año siguiente se observó una disminución de biomasa en el monocultivo y en la rotación de trigo-raps, mientras que en el 2013 sólo se observó la disminución en el monocultivo de trigo.

Cuadro 15. Biomasa aérea de trigo, en base a materia seca, para las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	Biomasa (kg ha <sup>-1</sup> )					
		2010	2011	2012	2013	2014	Total
CT	AR	7897 A	12598 A	12528 A	7370 A	9741 A	10027
	HA	8717 A	11645 A	12334 A	6847 A	9372 A	9783
	RA	8228 A	13188 A	11700 A	6646 A	7516 A	9456
	T	6827 A	12021 A	13140 A	6231 A	10255 A	9695
NT	AR	7549 A	9022 B	10727 A	6278 A	7929 A	8301
	HA	6443 A	9542 B	9747 A	7473 A	7123 A	8066
	RA	7186 A	9525 B	8484 B	6492 A	5769 A	7491
	T	6957 A	10904 A	7066 B	4762 B	6501 A	7238

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

Se observó interacción entre los sistema de labranza y las rotaciones de cultivos en el índice de cosecha en todos los años del ensayo (Cuadro 16). En general el índice de cosecha fue siempre mayor en cero labranza. Sin embargo, en el año 2010 el índice de cosecha de la rotación de trigo-arveja fue menor que el resto de las rotaciones en cero labranza, mientras que en los años 2011 y 2012 la rotación trigo-raps fue la que obtuvo los menores índices de cosecha en cero labranza, incluso menor a las rotaciones bajo labranza convencional el año 2012. En los dos últimos años se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre las rotaciones en labranza convencional, con valores mayores en el monocultivo de trigo (año 2013) y en las rotaciones con haba y raps (año 2014).

Cuadro 16. Índice de cosecha del cultivo de trigo en las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	Índice de cosecha				
		2010	2011	2012	2013	2014
CT	AR	0,25 B	0,23 C	0,23 B	0,08 C	0,14 B
	HA	0,25 B	0,22 C	0,26 B	0,04 C	0,18 A
	RA	0,23 B	0,24 C	0,22 B	0,09 C	0,20 A
	T	0,26 B	0,25 C	0,24 B	0,13 B	0,16 B
NT	AR	0,27 B	0,33 A	0,29 A	0,19 A	0,21 A
	HA	0,34 A	0,32 A	0,29 A	0,20 A	0,23 A
	RA	0,31 A	0,28 B	0,17 C	0,20 A	0,24 A
	T	0,35 A	0,30 A	0,30 A	0,21 A	0,21 A

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

Al igual que con el rendimiento, no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las rotaciones en los años 2010, 2011 y 2014 para el número de granos por metro cuadrado (Cuadro 17), encontrando diferencias estadísticamente significativas entre las rotaciones en el año 2012, con una disminución del número de granos en la rotación de trigo-raps en cero labranza, disminuyendo a la mitad con respecto a las rotaciones que incluyen leguminosas. En el año 2013 no se encontró interacción del sistema de labranza con la rotación de cultivos ni diferencias entre las rotaciones, encontrándose diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas de labranza, con los mayores valores en cero labranza.

Cuadro 17. Número de granos por metro cuadrado de las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	Granos m <sup>-2</sup>				
		2010	2011	2012	2013	2014
CT	AR	5077 A	7611 A	6457 A	1988 B	5115 A
	HA	5341 A	7289 A	6722 A	923 B	5359 A
	RA	5401 A	7988 A	5508 A	1875 B	4143 A
	T	4591 A	7583 A	7179 A	2190 B	6027 A
NT	AR	4366 A	7402 A	7909 A	3255 A	5365 A
	HA	4315 A	7356 A	7032 A	4305 A	4705 A
	RA	4475 A	6559 A	3673 B	3685 A	3845 A
	T	4440 A	8071 A	5356 A	3053 A	4833 A

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

La interacción del sistema de labranza con las rotaciones tuvo diferencias significativas en el peso de los granos en todos los años del ensayo, exceptuando el 2011 (Cuadro 18). El 2010 se observó un mayor peso de granos en cero labranza, siendo las rotaciones trigo-raps, trigo-haba y el monocultivo de trigo las que presentaron los mayores valores. El 2012, el efecto del sistema de labranza se invirtió, encontrando los mayores pesos en el sistema de labranza convencional; no obstante, en la rotación trigo-raps bajo cero labranza se observó un incremento del peso de grano en comparación al resto de las rotaciones en este sistema. En el caso del 2013, nuevamente se invirtió el efecto del sistema de labranza, en este caso el peso de los granos fue mayor en cero labranza; en labranza convencional se encontró que el monocultivo presentó el mayor peso de granos. En cuanto al 2014, se encontraron los menores pesos de granos en la rotación de trigo-arveja en labranza convencional y en el monocultivo de trigo, independiente del sistema de labranza.



Cuadro 18. Peso de mil granos (PS1000) de trigo, para las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	PS1000 (g)				
		2010	2011	2012	2013	2014
CT	AR	39,6 C	38,8 A	44,9 A	28,5 B	26,5 B
	HA	40,3 C	37,9 A	46,5 A	26,7 B	32,1 A
	RA	35,9 C	40,4 A	46,5 A	30,3 B	35,8 A
	T	38,0 C	40,3 A	43,0 A	34,9 A	25,7 B
NT	AR	45,7 B	40,7 A	39,8 B	34,5 A	32,3 A
	HA	49,9 A	41,3 A	40,8 B	34,3 A	34,3 A
	RA	51,0 A	40,2 A	45,1 A	35,5 A	37,4 A
	T	53,6 A	40,2 A	39,4 B	33,0 A	27,7 B

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

En el número de granos por espigas se encontraron diferencias significativas entre los años 2012-2014 (Cuadro 19). En el año 2012 hubo interacción del sistema de labranza con la rotación, observando una mayor cantidad de granos por espigas en cero labranza, con la excepción de la rotación trigo-raps, que fue estadísticamente igual a los tratamientos en labranza convencional. El año 2013 las diferencias se explican solo por los sistemas de labranza, en este sentido se observó una mayor cantidad de granos por espiga en cero labranza. En el último año del ensayo también se observó interacción del sistema de labranza con la rotación; en este año se observó una mayor cantidad de granos sólo en el monocultivo de trigo de cero labranza.

Cuadro 19. Número de granos por espiga en las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	Granos espigas <sup>-1</sup>				
		2010	2011	2012	2013	2014
CT	AR	15,8 A	18,5 A	17,2 B	4,3 B	11,6 B
	HA	14,5 A	16,7 A	19,9 B	2,0 B	13,3 B
	RA	15,6 A	17,1 A	16,1 B	4,3 B	13,4 B
	T	16,9 A	16,8 A	16,6 B	5,8 B	13,1 B
NT	AR	15,1 A	23,7 A	24,1 A	11,5 A	17,8 B
	HA	17,6 A	21,5 A	24,1 A	12,3 A	18,1 B
	RA	18,6 A	20,3 A	13,5 B	12,0 A	18,1 B
	T	21,4 A	20,0 A	25,8 A	15,9 A	25,1 A

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

Se observó interacción de los sistemas de labranza y las rotaciones para el número de espigas por metro cuadrado en todos los años del estudio (Cuadro 20). En general la labranza convencional obtuvo mayores valores de espigas por metro cuadrado en comparación con la cero labranza, además no se observaron diferencias estadísticamente significativas entre las rotaciones en labranza convencional, exceptuando el año 2014, con una menor cantidad de espigas en la rotación con raps. En cero labranza se observaron diferencias entre las rotaciones entre los años 2010 y 2013; al principio se observó que la rotación trigo-arveja obtuvo la mayor cantidad de espigas por metro cuadrado. Al siguiente año fue el monocultivo de trigo, efecto que no se mantuvo los años siguientes. El año 2012 la mayor cantidad de espigas ocurre en las rotaciones que presentan leguminosas, mientras que el 2013 fue solo la rotación trigo-haba la que obtuvo los mayores valores en cero labranza.

Cuadro 20. Número de espigas por metro cuadrado en las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	Espigas m <sup>-2</sup>				
		2010	2011	2012	2013	2014
CT	AR	325 A	412 A	385 A	443 A	449 A
	HA	371 A	420 A	345 A	463 A	410 A
	RA	348 A	461 A	346 A	425 A	326 B
	T	293 A	450 A	437 A	389 A	506 A
NT	AR	315 A	319 B	330 A	309 B	310 B
	HA	251 B	350 B	290 A	369 A	271 B
	RA	249 B	328 B	242 B	303 B	216 B
	T	211 B	418 A	210 B	189 C	207 B

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

En el establecimiento de plantas también se encontró interacción de los sistemas de labranza con las rotaciones (Cuadro 21). Al igual que en el número de espigas, no se encontraron diferencias significativas entre las rotaciones en labranza convencional. En el año 2011 solo se observó efecto del sistema de labranza, con un mejor establecimiento en cero labranza. En el resto de los años se observó que el monocultivo de trigo obtuvo los menores valores de establecimiento en cero labranza. Este menor valor de establecimiento también se observó en la rotación trigo-arveja el año 2014.

Cuadro 21. Establecimiento de plantas en las rotaciones de cultivo en los dos sistemas de labranza, durante los cinco años de estudio (n=4).

SL	Rotación	Establecimiento (plantas m <sup>-2</sup> )				
		2010	2011	2012	2013	2014
CT	AR	212 A	239 B	267 A	303 A	173 A
	HA	194 A	232 B	238 A	283 A	176 A
	RA	208 A	228 B	237 A	275 A	183 A
	T	209 A	232 B	254 A	274 A	173 A
NT	AR	199 A	256 A	220 A	177 B	75 D
	HA	191 A	255 A	273 A	195 B	145 B
	RA	210 A	252 A	219 A	159 B	106 C
	T	144 B	266 A	141 B	71 C	83 D

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Letras mayúsculas en sentido vertical indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

La relación entre las propiedades físicas (de los primeros 15 cm) y el rendimiento de los años en los cuales se encontraron diferencias entre los tratamientos (2012 y 2013) se observa en la Figura 1, buscando si alguna propiedad física explica la variabilidad del rendimiento de esos años. En el gráfico biplot se observa que el 80,1% de la variabilidad total de los tratamientos es explicado por los componentes principales uno y dos. Dentro del CP1, el cual explica un 65,1% de la variabilidad total, se observa que las rotaciones realizadas en cero labranza se separan de las rotaciones en labranza convencional.

El rendimiento del año 2012, el cual presentó un monto alto de precipitaciones, se asocia a una alta cantidad de poros de aireación, ya sean rápidos o lentos, como también a una mayor cantidad de poros totales, lo cual se asocia a los tratamientos en labranza convencional. A su vez estos tratamientos se asocian a una alta VDMA, en otras palabras, presentaron una menor estabilidad de agregados.

En cero labranza, las rotaciones se asocian positivamente con la resistencia a la penetración y el porcentaje de poros de agua inutilizable, en otras palabras estos tratamientos presentaron la mayor resistencia a la penetración y la mayor cantidad de poros de agua no disponible. Se debe destacar que estas rotaciones también se asociaron positivamente con los rendimientos del año 2013, el cual corresponde al año de menor rendimiento por la mayor sequía terminal.

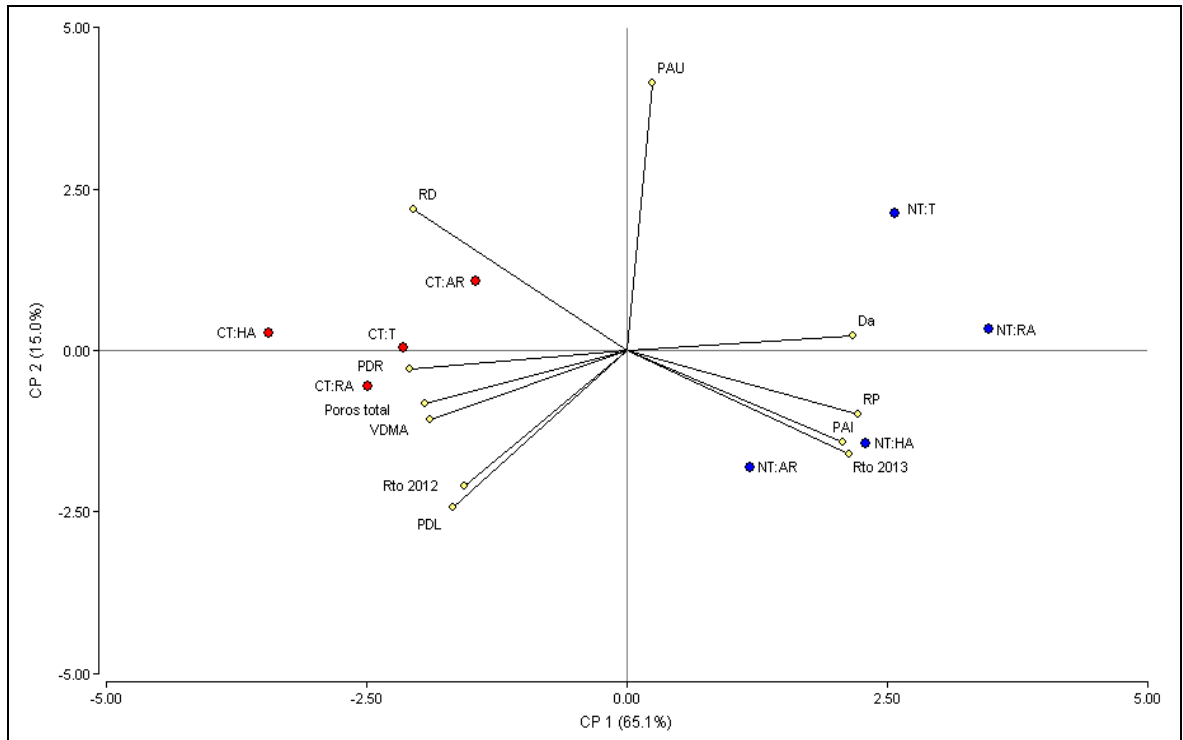


Figura 1. Análisis de componentes principales para las rotaciones de cultivo en los sistemas de labranza NT y CT (cero labranza y labranza convencional respectivamente) en función de las propiedades físicas de suelo y el rendimiento de trigo los años 2012 y 2013. AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo; RD: relación de dispersión; PDR: poros de drenaje rápido, VDMA: variación del diámetro medio de los agregados, PDL: poros de drenaje lento; PAU: poros de agua utilizable; Da: densidad aparente; RP: resistencia a la penetración; PAI: poros de agua inutilizable; Rto: rendimiento.

## DISCUSIÓN

### Propiedades físicas de suelo

Con los resultados obtenidos de propiedades físicas de suelo, se observa que existe un aumento en la compactación de suelo en cero labranza en comparación con la labranza convencional. Esta compactación, marcada entre los 5-15 cm de profundidad, ha sido identificada con anterioridad en otros trabajos (Kaiser *et al.*, 2013) y se pudo diagnosticar por una mayor resistencia a la penetración, un aumento en la densidad aparente y en la pérdida de la calidad de la distribución de tamaño de poros, destacando la disminución de los poros de drenaje rápido. Los cambios abruptos de densidad aparente en el perfil generan una discontinuidad porosa (Apéndice 3), la que en el caso del sistema de labranza convencional se genera a partir de los 15 cm (Olesen y Munkholm, 2007).

Para este estudio no existió un efecto importante de las rotaciones de cultivos en las propiedades físicas de suelo. En labranza convencional no se esperaban diferencias significativas entre las rotaciones, dada la homogeneización estructural que genera la labranza año a año (Głąb *et al.*, 2013), lo cual ocurrió. Por otra parte en cero labranza se esperaban diferencias entre las rotaciones, dependientes del hábito de crecimiento radical de los cultivos, sin embargo sólo en algunas propiedades físicas hubo efecto de la rotación, como la resistencia a la penetración, en tanto en otras propiedades los cambios dependientes de las rotaciones se concentraron en la superficie del perfil.

Los valores de densidad real están dentro del rango esperado para suelo de mineralogía cristalina (Sandoval *et al.*, 2012); la menor densidad real en labranza convencional en profundidad (15-55 cm) es debida a la incorporación de materia orgánica en el perfil de suelo, a consecuencia de la labranza, la que pondera con menores valores de densidad de partículas, disminuyendo el promedio general del suelo.

La densidad aparente en cero labranza tuvo los mayores valores entre los 2 y 15 cm de profundidad. Altos valores de densidad aparente en cero labranza han sido reportado por otros autores (Kay y VandenBygaart, 2002; López-Fando *et al.*, 2007; Jat *et al.*, 2009; Celik *et al.*, 2012), observando en la mayoría de los casos este aumento en las estratas superficiales.

En cuanto a los poros totales, las rotaciones con leguminosas y el monocultivo de trigo presentaron altos porcentajes de poros totales (mayor al 52 %) en superficie, efecto que puede estar explicado por la mantención del rastrojo como mulch, cuya presencia incrementa la porosidad total (Mulumba y Lal, 2008). La menor porosidad entre los 0-2 y 2-5 cm de profundidad en la rotación trigo-raps concuerda con los valores de mayor densidad aparente.

Al clasificar los poros, se observa que el sistema de cero labranza tuvo la mayor cantidad de poros de drenaje rápido en los primeros centímetros de suelo. Este alto valor puede estar

dado por la alta acumulación de materia orgánica en superficie, lo cual es característico de la cero labranza, sistema en el que además ocurre una estratificación de la materia orgánica (de Oliveira Ferreira *et al.*, 2013; Melero *et al.*, 2012).

Fue posible establecer la existencia de la discontinuidad de estos poros en cero labranza realizando un ANDEVA con el factor profundidad anidado al bloque (Cuadro 22), encontrándose interacción entre el sistema de labranza y la profundidad. En el caso de la labranza convencional, se observó una discontinuidad porosa bajo los 15 cm de profundidad, lo cual ocurre entre la capa arable y el suelo bajo esta zona, fenómeno observado con anterioridad por Olesen y Munkholm (2007). En cero labranza se observó una abrupta disminución de poros de drenaje rápido desde 2 cm, que se repite a los 5-15 cm de profundidad.

Cuadro 22. Interacción entre los sistemas de labranza y la profundidad de suelo para los poros de drenaje rápido (PDR).

SL	PDR (%)				
	0-2 cm	2-5 cm	5-15 cm	15-35 cm	35-55 cm
CT	15,9 B	15,9 B	15,9 B	12,6 C	11,2 C
NT	28,1 A	16,3 B	8,5 D	10,4 C	11,4 C

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza. Letras mayúsculas indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

Si bien en las rotaciones con leguminosas en cero labranza no se observaron diferencias significativas en estas propiedades físicas de suelo, se observó que estas rotaciones permiten una disminución de la densidad aparente, con medias de  $1,32 \text{ Mg m}^{-3}$  y un aumento en la porosidad total entre los 2-5 cm; además tendieron a una mayor cantidad de poros de drenaje rápido en los primeros 5 cm superficiales, como también un mayor porcentaje de poros de drenaje lento, observando los mayores porcentajes en los primeros 15 cm de profundidad en cero labranza. Esto puede estar explicado por el cambio del sistema radical fasciculado del trigo a un sistema radical pivotante con alta presencia de raíces laterales (Trükmann *et al.*, 2006). El sistema pivotante de las leguminosas genera abundantes raíces secundarias en superficie, generando bioporos en los primeros centímetros de profundidad, lo que actúa como una labranza biológica, lo que permite soltar la consolidación superficial (Liu *et al.*, 2011). Es por este motivo que resulta importante estudiar el efecto que estas rotaciones tienen en el largo plazo.

Según la clasificación de los poros de agua utilizable realizada por Reynolds *et al.* (2009), se considera que estos poros en el rango de 10 a 15% son limitantes para el crecimiento y funcionalidad de raíces, lo que ocurre en todo el perfil en labranza convencional. En cero labranza, los poros de agua utilizable en el monocultivo se encontraron en un rango ideal (> 20%) a bueno (15-20%) en superficie, siendo limitante bajo los 5 cm. En los 2 cm de profundidad las rotaciones con leguminosas en cero labranza tuvieron valores de poros de agua aprovechable en un nivel limitante, en cambio la rotación de trigo-raps se encontró en un nivel bueno.

Al ponderar los poros de agua aprovechable por el espesor de cada estrata, se calculó el agua aprovechable como una altura de agua (Apéndice 4). Se encontró interacción entre los sistemas de labranza y las rotaciones para la humedad aprovechable. La mayor humedad aprovechable se observó en tres rotaciones realizadas en cero labranza (trigo-arveja, trigo-raps y trigo-trigo) y en la rotación de trigo-haba realizada en labranza convencional. Estos cuatro tratamientos corresponden a su vez a los que presentaban un mayor contenido de poros de agua útil entre los 35 y los 55 cm de profundidad de suelo.

En cero labranza se observó una mayor cantidad de poros de agua inutilizable en los primeros 5 cm de profundidad, lo que podría ser favorable en años secos, debido a que los poros de menor diámetro permiten una menor pérdida de agua por percolación profunda y una menor evaporación directa desde la superficie del suelo si es que éste posee un mulch, manteniendo el agua en el perfil por una mayor cantidad de tiempo (Brooks *et al.*, 2010).

El monocultivo, sin tener diferencias estadísticamente significativas, tuvo la menor cantidad de poros de agua no utilizable en los 0-5 cm de profundidad en cero labranza, además tuvo la mayor cantidad de poros de agua utilizable en esta misma profundidad. Una de las razones es la gran cantidad de rastrojo que deja el monocultivo, generando un mulch, a diferencia de los otros cultivos de las rotaciones en estudio, los cuales a su vez se degradan con mayor facilidad. Este mulch protege de la evaporación directa desde el suelo, como también incentiva la generación de porosidad secundaria y mejora la infiltración de agua en el perfil (Martínez *et al.*, 2011). Según Mulumba y Lal (2008), con bajas cantidades de rastrojos como mulch se logra un impacto importante en el aumento de la humedad aprovechable, pero se debe asegurar la mineralización y generación de productos secundarios de estos residuos (Abiven *et al.*, 2008). Esto también es favorecido por la cantidad de residuos que pueden dejar estas raíces en el perfil de suelo como aporte de materia orgánica, cuya composición de carbono puede ser más estable que la generada por los residuos en superficie (Kätterer *et al.*, 2011).

La resistencia a la penetración en cero labranza mostró de forma clara que existen problemas en los primeros centímetros de profundidad. Si bien este sistema comienza con una baja resistencia a la penetración superficialmente, esta variable aumenta en casi 1000 kPa entre los 2 y 5 cm de profundidad; posteriormente vuelve a aumentar en aproximadamente 1000 kPa al llegar a los 5 cm de profundidad, alcanzando los 2600 kPa, lo cual puede provocar problemas en el establecimiento del sistema radical de los cultivos (Hadas, 1997). Este problema ya había sido observado por Martínez *et al.* (2008), quienes establecieron que el sistema de cero labranza posee 1,49 veces mayor resistencia que el sistema de labranza convencional entre 0-5cm de profundidad.

Las mayores resistencias se encontraron en la rotación de trigo-raps. Para esta rotación se observó que después de los 2 cm de profundidad la resistencia a la penetración supera los 2000 kPa, valor que restringe el crecimiento de las raíces (Taylor y Brar, 1991; Schoeneberger *et al.*, 2012) e incluso se sobrepasan los 3000 kPa desde los 5 cm de profundidad.

Se observó que las otras rotaciones pueden generar una disminución en la resistencia a la penetración en los centímetros superficiales, sin embargo bajo los 5 cm de profundidad

estas mismas rotaciones no son capaces de aliviar los problemas de alta resistencia mecánica, observándose valores por sobre los 2000 kPa. Estos problemas de alta resistencia a la penetración en cero labranza pueden estar dados por el peso de la maquinaria de siembra directa (3,1 Mg), lo cual está muy bien documentado en investigaciones anteriores (Botta *et al.*, 2006; Martínez *et al.*, 2008). Por su parte, la labranza convencional busca aliviar la alta resistencia generada por consolidación natural y por el paso de maquinaria en superficie (Horn *et al.*, 2007, Martínez *et al.*, 2008), lo que en este caso se logra hasta una profundidad de 25 cm. Sin embargo, en el rango de profundidad siguiente el valor de resistencia se duplicó en el sistema de labranza convencional, alcanzando valores superiores a los 4000 kPa, considerado como muy alto según Schoeneberger *et al.* (2012).

Desde los 15 hasta los 35 cm de profundidad se pierde el efecto realizado por las raíces de los diferentes cultivos, predominando el efecto de los sistemas de labranza. En los 15-25 cm de profundidad se observó una mayor resistencia en cero labranza, mientras que de 25-35 cm profundidad la mayor resistencia se observó en el sistema de labranza convencional. Esto es común en este sistema, resultado del laboreo continuo a una misma profundidad por varios años, lo cual puede generar una estrata más densa (pie de arado) causada en la zona de corte de la maquinaria; sin embargo, esto es remediable variando la profundidad de la labranza en los años siguientes (Jones *et al.*, 1989).

Para la resistencia a la penetración en profundidad (35-55 cm), se observaron valores que van desde los 3800 kPa hasta los 7600 kPa, lo que afectaría fuertemente la capacidad de enraizamiento de los cultivos, ya que de acuerdo a Schoeneberger *et al.* (2012), niveles de resistencia de entre 4000 y 8000 kPa son considerados muy altos e impedirán el crecimiento de raíces. Estos resultados de resistencia a la penetración podrían ser objetables por el hecho de que a esta profundidad (35-55 cm) existe una alta cantidad de clastos, lo cual puede interferir con la medición del equipo, incrementando artificialmente sus valores. En esta profundidad se destaca el bajo efecto del haba y el raps en el sistema de labranza convencional, que aumentaron significativamente la resistencia respecto al monocultivo y la rotación con arveja y con respecto a todas las rotaciones en cero labranza.

En la macroestructura, se apreciaron valores de VDMA mayores a 4,5 mm en los dos sistemas de labranza, lo cual es considerado una estructura inestable según Hartge y Horn (2009), quienes consideran una estructura estable cuando se obtienen valores de VDMA cercanos a 1,2 mm. Al comparar los sistemas de labranza, se observó una mayor estabilidad de macroagregados en cero labranza en superficie, aunque disminuyó fuertemente en profundidad.

La mayor estabilidad de macroagregados (menor VDMA) detectada en superficie ocurre por la mayor cantidad de materia orgánica en relación a las estratas más profundas, lo cual es importante para la formación y mantención de los macroagregados (Six *et al.*, 2000; Fuentes *et al.*, 2009). A esto se le adiciona el efecto de los rastros sobre la superficie del suelo, lo que genera una protección física contra el impacto de la gota de lluvia frente a un evento de precipitación (Jordán *et al.*, 2010). Este efecto dependerá de la cantidad y calidad de los rastros, ya que como cada rotación deja distintas cantidades y tipos de rastros, podrían generarse diferencias entre las rotaciones; sin embargo, las mediciones de las propiedades físicas de suelo de este estudio se realizaron al cuarto año desde que ocurrió la



primera rotación efectiva, por lo que aún no ha transcurrido el tiempo suficiente para denotar cambios más profundos. Es de esperarse que los cambios entre las rotaciones se generen a más largo plazo, como algunos estudios que comienzan a ver los efectos de labranza, la mantención de rastrojos y la rotación de cultivos al cabo de diez años (Fuentes *et al.*, 2009; Govaerts *et al.*, 2007). El efecto sobre la estabilidad estructural en cer labranza va desapareciendo en profundidad a medida que disminuye el contenido de materia orgánica, generando incluso que entre los 15-35 cm de profundidad se encontrara una mayor estabilidad de macroagregados en labranza convencional. Aunque en labranza convencional se observó una estabilidad de macroagregados baja (altos valores de VDMA), esta fue más homogénea en el perfil, y los valores logrados en este sistema de labranza son esperables para suelos agrícolas de la zona central de Chile (Fuentes *et al.*, 2011).

Por otro lado, en la estabilidad de microagregados se encontraron valores sobre el 30%, lo cual según Berryman *et al.* (1982) es considerado como muy inestable. No obstante, algunos trabajos realizados en Chile por Seguel *et al.* (2011, 2013) en texturas similares a las de este estudio, han encontrado valores más altos de relación de dispersión a lo establecido por Berryman *et al.* (1982), lo que también ocurrió en el estudio realizado por Singh *et al.* (2014) en una rotación trigo-arroz de largo plazo.

La prueba de relación de dispersión mostró una mayor estabilidad de microagregados en cero labranza en comparación a la labranza convencional. Resultados similares obtuvieron Singh *et al.*, (2014), quienes observaron una mayor estabilidad de microagregados en todo el perfil, en tres clases texturales distintas bajo cero labranza. Esta mayor estabilidad de microagregados en cero labranza ocurre debido a que hay una menor alteración de los macroagregados, lo cual permite un mayor tiempo para la unión de la materia orgánica particulada fina con minerales de suelo como arcillas y compuestos provenientes de los microorganismos (Six *et al.*, 2000).

Entre los 5-15 cm de profundidad se observó una disminución en la estabilidad de microagregados (mayor relación de dispersión) en el monocultivo de trigo en comparación al resto de las rotaciones en cero labranza, aunque manteniendo mejor condición que la labranza convencional. Esto también se puede observar en las primeras dos estratas de suelo, aunque sin observar diferencias significativas. Según Ball *et al.* (2005) la rotación de cultivo puede generar una mayor estabilidad, debido a que al cambiar el cultivo se van generando depósitos de rizobios de distinta cantidad y calidad, además de generar asociaciones con especies de hongos que van generando microagregados. En este contexto, Wang *et al.* (2010) observaron una mayor estabilidad de microagregados en la rotación trigo-soya al compararlo con una rotación trigo-maíz, estabilidad que se explica por la composición bioquímica y cantidad de residuo que se deja en el suelo, lo que afecta a la formación de agregados y la tasa de renovación de estos (Six *et al.*, 2000).

## Rendimiento del cultivo

El rendimiento de trigo es explicado principalmente por el año. Este ensayo se realizó en secano, por lo tanto las diferencias en el monto y la distribución de precipitaciones de los cinco años generaron las diferencias interanuales de los rendimientos. El efecto año, a su vez, presentó interacción con los sistemas de labranza, observándose diferencias entre los sistemas en algunos años. Los rendimientos de los cinco años de estudio son considerados bajos, observándose valores que no superaron los 3000 kg ha<sup>-1</sup>, debido a la baja precipitación, que fluctuó entre 137 y 223 mm en el periodo de desarrollo del cultivo.

Las diferencias del rendimiento a través de los años es explicado principalmente por la distribución de las precipitaciones durante la temporada más que por el monto anual. Así, los años 2011 y 2012 presentaron una mejor distribución a lo largo de la temporada, logrando los mayores rendimientos del ensayo.

En los otros 3 años del estudio se apreció una mayor sequía terminal, típica de los ambientes mediterráneos, concentrando las precipitaciones en los primeros estados de desarrollo del cultivo, lo cual pudo influir en la disminución de rendimiento de esos años. Esta sequía también se expresó en la disminución de la biomasa, el índice de cosecha, el número de granos por metro cuadrado, el peso de los mil granos y los granos por espiga, especialmente el 2013, año que presentó el mayor déficit hídrico, disminuyendo el rendimiento de ambos sistemas labranza.

En general no hubo diferencias en rendimiento entre los sistemas de labranza, exceptuando los años 2012 y 2013. En el caso del año 2013 el mayor rendimiento ocurrió en cero labranza, esta diferencia también se observó en el índice de cosecha, el número de granos por metro cuadrado, el peso de los granos y los granos por espigas. La insuficiente precipitación de este año en la fase reproductiva afectó la determinación del número de granos, probablemente por la muerte de floretes (Silva *et al.*, 2011), lo cual se refleja en la escasa cantidad de granos por espiga, específicamente en labranza convencional. Esta condición climática también afectó el llenado de granos, reduciendo la elongación y acumulación de éste, reflejado en el menor número de granos y peso de los mismos.

El mayor rendimiento en cero labranza en el 2013 puede ser explicado por la mayor retención de agua en el suelo, debido a la mayor cantidad de materia orgánica (Arshad *et al.*, 1999). Amato *et al.* (2013) observaron un mayor rendimiento en cero labranza comparado con la labranza convencional cuando el estrés hídrico fue mayor durante el ciclo de desarrollo del cultivo en un ambiente mediterráneo, lo cual concuerda con resultados obtenidos por otros autores (De Vita *et al.* 2007; Ben Moussa-Machraoui *et al.*, 2010; Pittelkow *et al.*, 2015).

Este mayor rendimiento en cero labranza se asoció a una mayor cantidad de poros de agua inútil (Figura 1). Esta asociación podría indicar el beneficio de estos poros cuando se presenta una sequía muy extrema. Los poros más finos retienen el agua con mayor energía y por mayor tiempo (Jury y Horton, 2004), y aunque el gasto energético que requieren las plantas para extraer el agua sea mayor, esto sigue siendo beneficioso al permitir completar

la fenología del cultivo, disminuyendo el efecto negativo del estrés hídrico sobre el rendimiento.

Al estimar el rendimiento en base a las precipitaciones del año 2013 (137 mm) con una eficiencia del uso del agua de  $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ mm}^{-1}$ , asumiendo una evaporación directa desde el suelo de 100 mm (French y Schultz, 1984) se obtiene un rendimiento de  $814 \text{ kg ha}^{-1}$ , lo cual se observó en la labranza convencional, especialmente en el monocultivo (Cuadro 14). Por su parte en cero labranza, con la misma precipitación, se produjo un rendimiento promedio de  $1227 \text{ kg ha}^{-1}$ , lo cual corresponde a un rendimiento que se obtendría con una precipitación de 156 mm. Estos 19 mm de diferencia pueden estar explicados por la mayor humedad aprovechable del sistema de cero labranza en comparación a la labranza convencional (Apéndice 4). Además, como se mencionó anteriormente, la mantención del rastrojo permite tener más agua en el suelo, disminuyendo la evaporación directa (Allen *et al.*, 2006). Otra posible explicación podría ser la baja cantidad de plantas (bajo establecimiento), las cuales a su vez no produjeron tantos macollos (menor número de espigas  $\text{m}^{-2}$ ) y tuvieron una baja biomasa, lo que debió generar una menor demanda de agua del cultivo, permitiendo completar de mejor forma el llenado de granos.

El 2012 se observó un menor rendimiento en cero labranza al comparar con la labranza convencional, situación que se ha observado en otros trabajos (Mrabet, 2011; Amato *et al.*, 2013; Shertzer, 2013). También se observó una menor biomasa y menor peso de los granos. Al observar el rendimiento de las rotaciones en este año, se observó una disminución del rendimiento en la rotación trigo-raps y el monocultivo de trigo en cero labranza (Cuadro 14). Esta disminución de rendimiento se relaciona con la compactación que se generó en estas rotaciones, principalmente en la rotación con raps, y posiblemente a la menor proporción de poros de drenaje bajo los 5 cm en el monocultivo de trigo, lo que pudo generar problemas sanitarios o en el establecimiento del trigo.

Para explicar la disminución de rendimiento de estos tratamientos el año 2012, se realizó una regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS), lo cual se puede observar en la Figura 2. De este PLS se observa que el rendimiento del año 2012 se asoció principalmente a las lluvias entre primer nudo y espigadura, y que el rendimiento de la rotación trigo-raps y el monocultivo de trigo en cero labranza se afectaron negativamente por la mayor cantidad de precipitaciones entre estos estados. Precipitaciones entre primer nudo y espigadura pueden afectar al rendimiento, debido a que en este momento se afecta el número de espigas por plantas y en consecuencia, el número de espiguillas, los granos por espiguilla y el número de granos (Slafer *et al.*, 2003). En cuanto a este trabajo, se observó la disminución del número de espigas por metro cuadrado en la rotación trigo-raps y el monocultivo de trigo en cero labranza.

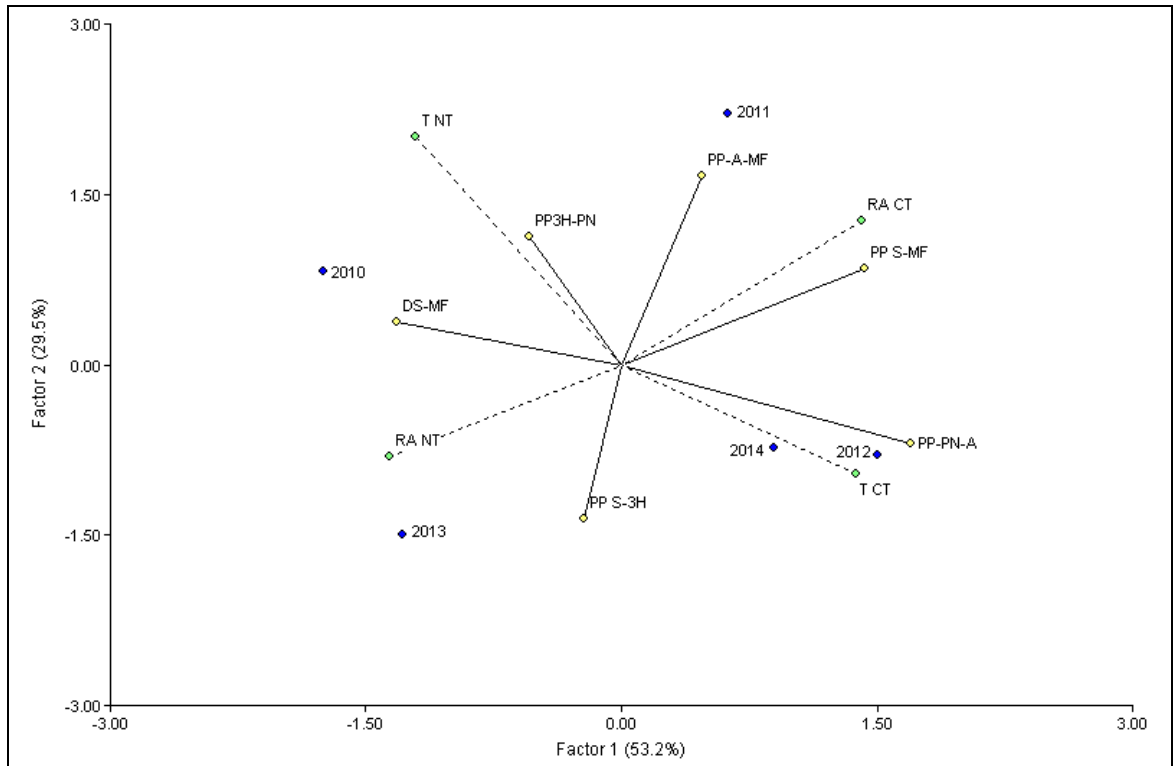


Figura 2. Regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS) para RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo en los sistemas de labranza NT y CT (cero labranza y labranza convencional respectivamente). PP S-MF: Precipitación ciclo completo; PP S-3H: precipitación entre siembra y tercera hoja; PP 3H-PN: precipitación entre tercera hoja y primer nudo; PP PN-A: precipitación entre primer nudo y espigadura; PP A-MF: Precipitación entre espigadura y madurez fisiológica; DS-MF: número de días entre emergencia y madurez fisiológica.

Del análisis de componentes principales se observó una alta relación entre el rendimiento del 2012 con la labranza convencional (Figura 1), obteniendo rendimientos mayores que en cero labranza. Estos tratamientos se caracterizaron por una mayor porosidad total, como también una mejor distribución de poros de aireación en el perfil. Esto puede explicar el mayor rendimiento que ocurre en labranza convencional con respecto a la cero labranza en años húmedos. Este último sistema se caracterizó por una baja porosidad de aireación y una alta compactación, condición de alto potencial de anegamiento y temperaturas de suelo más bajas, lo que puede afectar el establecimiento del cultivo y el crecimiento de raíces (Pittelkow *et al.*, 2015).

En el largo plazo, las rotaciones en cero labranza generan menor variabilidad temporal (Apéndice 5) y aunque este sistema no supera los rendimientos promedios del sistema de labranza convencional, sus menores costos asociados a un menor número de pasadas de maquinaria genera un mayor ingreso económico (Karlen *et al.*, 2013), con el beneficio ambiental generado por la captura de carbono orgánico (Franzluebbers, 2010), aumentando la sustentabilidad del sistema, lo cual puede ser potenciado con rotaciones de cultivos (Silva *et al.*, 2015).

## CONCLUSIONES

En los cinco años del ensayo, en un Mollisol con clase textural Franco arcillosa de clima mediterráneo, se puede concluir que las rotaciones de cultivos no provocan cambios en las propiedades físicas de suelo en labranza convencional.

La rotación de cultivos tiene un efecto en cero labranza, pero estas diferencias se concentran en superficie, encontrando principalmente un aumento en la densidad aparente y una disminución en los poros totales entre 0-2 cm, además del aumento en la resistencia a la penetración entre 2-15 cm en la rotación trigo-raps. Se encontró una mayor cantidad de poros de agua útil a los 0-2 cm en el monocultivo y en todos los tratamientos a excepción de la rotación trigo-haba en profundidad (35-55 cm). En el monocultivo también se encontró una menor estabilidad de microagregados entre 5-15 cm.

Las rotaciones con leguminosas podrían mejorar algunas propiedades en superficie, como la densidad aparente y la porosidad total del suelo, destacando una mejor porosidad de drenaje.

En cero labranza se observó una compactación entre los 5 y los 15 cm de profundidad, la cual no es afectada por ninguno de los cultivos de la rotación; en labranza convencional se observa una compactación bajo los 25 cm de profundidad, que tampoco es afectada por las rotaciones de cultivo.

De los cinco años de estudiados, sólo en dos años se observó efecto del sistema de labranza en el rendimiento. En el año más seco (2013) se observaron los mayores rendimientos en cero labranza por la acumulación de materia orgánica y mantención de rastrojos en superficie, mientras que en el año de mayor precipitación (2012) la rotación trigo-raps y el monocultivo de trigo en cero labranza tuvieron los menores rendimientos.

## LITERATURA CITADA

- Abiven, S.; S. Menasseri; D. Angers and P. Leterme. 2008. A model to predict soil aggregate stability dynamics following organic residue incorporation under field conditions. *Soil Science Society of America Journal*, 72(1): 119-125.
- Agostini, M.; G. Studdert; S. Martino; J. Costa; R. Balbuena; J. Ressia; G. Mendivil and L. Lázaro. 2012. Crop residue grazing and tillage systems effects on soil physical properties and corn (*Zea mays* L.) performance. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 12(2): 271-282.
- Allen, R.; L. Pereira; D. Raes; M. Smith. 2006. Evapotranspiración de cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 323p.
- Alvarez, R. and H. Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*, 104(1): 1-15.
- Amato, G.; P. Ruisi; A. Frenda; G. Di Miceli; S. Saia; A. Plaia and D. Giambalvo. 2013. Long-term tillage and crop sequence effects on wheat grain yield and quality. *Agronomy Journal*, 105(5): 1317-1327.
- Anyanzwa, H.; J. Okalebo; C. Othieno; A. Bationo; B. Waswa and J. Kihara. 2010. Effects of conservation tillage, crop residue and cropping systems on changes in soil organic matter and maize-legume production: a case study in Teso District. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88(1): 39-47.
- Arshad, M. A.; A. J. Franzluebbers and R. H. Azooz. 1999. Components of surface soil structure under conventional and no-tillage in northwestern Canada. *Soil and Tillage Research*, 53(1): 41-47.
- Ball, B. C.; I. Bingham; R. M. Rees; C.A. Watson and A. Litterick. 2005. The role of crop rotations in determining soil structure and crop growth conditions. *Canadian Journal of Soil Science*, 85(5): 557-577.
- Balzarini, M.; C. Bruno y A. Arroyo. 2005. Análisis de Ensayos Agrícolas Multiambientales. Ejemplos en Info - Gen. Córdoba, Argentina: Universidad Nacional de Córdoba. 141p.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management – a review. *Soil Use and Management*, 25: 335-345.
- Ben Moussa-Machraoui, S.; F. Errouissi; M. Ben-Hammouda and S. Nouria. 2010. Comparative effects of conventional and no-tillage management on some soil properties under Mediterranean semi-arid conditions in northwestern Tunisia. *Soil and Tillage Research*, 106: 247-253.
- 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. 116 p.
- Bhattacharyya, R.; V. Prakash; S. Kundu and H. S. Gupta. 2006. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. *Soil and Tillage Research*, 86: 129-140.

- Botta, G. F.; D. Jorajuria; H. Rosatto; and C. Ferrero. 2006. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil and Tillage Research*, 86(1): 9-14.
- Brooks, J.R.; H.R. Barnard; R. Coulombe and J.J. McDonnell. 2010. Ecohydrologic separation of water between trees and streams in a Mediterranean climate. *Nature Geoscience*, 3(2): 100-104.
- Castellini, M. and D. Ventrella. 2012. Impact of conventional and minimum tillage on soil hydraulic conductivity in typical cropping system in Southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 124: 47-56.
- Celik, I.; M. M. Turgut and N. Acir. 2012. Crop rotation and tillage effects on selected soil physical properties of a Typic Haploxerert in an irrigated semi-arid Mediterranean region. *International Journal Plant Production*, 6: 457-480.
- Cerda J. 2015. Variabilidad espacial y temporal de propiedades físicas de suelo bajo y fuera de la huella del tractor en dos sistemas de labranza. Memoria de Título para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, Chile. 116 p.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación N°115 Chile. 425p.
- D'Haene, K.; J. Vermang; W. M. Cornelis; B. L. M. 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 and Tillage Research*, 99: 279-290.
- de Oliveira Ferreira, A.; T. J. C. Amado; R. da Silveira Nicoloso; J. C. de Moraes Sa; J. E. Fiorin; D. S. S. Hansel and D. Menefee. 2013. Soil carbon stratification affected by long-term tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 133: 65-74.
- De Vita, P.; E. Di Paolo; G. Fecondo; N. Di Fonzo and M. Pisante. 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil and Tillage Research*, 92: 69-78.
- Franzluebbers, A. 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the southeastern United States. *Soil Science Society of America Journal*, 74(2): 347-357.
- French, R. J. and J. E. Schultz. 1984. Water use efficiency of wheat in a Mediterranean-type environment. I. The relation between yield, water use and climate. *Crop and Pasture Science*, 35(6): 743-764.
- Fuentes, M.; B. Govaerts; F. De León; C. Hidalgo; L. Dendooven; K. Sayre and J. Etchevers. 2009. Fourteen years of applying zero and conventional tillage, crop rotation and residue management systems and its effect on physical and chemical soil quality. *European Journal of Agronomy*, 30(3): 228-237.
- Fuentes, I.; O. Seguel y M. Casanova. 2011. Degradación física de suelos de la zona central versus suelos volcánicos del sur de Chile. (pp. 3-40) En: Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo (24°, 11 y 12 de Julio, Santiago, Chile). Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo, Universidad de Chile. 173 p.
- Głąb, T. 2007. Effect of soil compaction on root system development and yields of tall fescue. *International Agrophysics*, 21: 233-239.
- Głąb, T.; B. Ścigalska and B. Łabuz. 2013. Effect of crop rotations with triticale (*Triticosecale* Wittm.) on soil pore characteristics. *Geoderma*, 202-203: 1-7.

- Govaerts, B.; M. Fuentes; M. Mezzalama; J. M. Nicol; J. Deckers; J. D. Etchevers and K. D. Sayre. 2007. Infiltration, soil moisture, root rot and nematode populations after 12 years of different tillage, residue and crop rotation managements. *Soil and Tillage Research*, 94(1): 209-219.
- Hadas, A. 1997. Soil tilth—the desired soil structural state obtained through proper soil fragmentation and reorientation processes. *Soil and Tillage Research*, 43(1): 7-40.
- Hallet, P.; D. Feeney; A.G. Bengough; M. Rillig; C. Scrimgeour and I. Young. 2009. Disentangling the impact of AM fungi versus root on soil structure and water transport. *Plant and Soil*, 314(1-2): 183-196.
- Hartge, K.H. und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Boden. In: Schweizerbart, E. (Ed.) Praxis messmethoden auswertung. 4 Auflage. Stuttgart, Deutschland. Schweizerbart. 178 S.
- Horn, R. 2003. Stress-strain effects in structured insaturated soils on coupled mechanical and hydraulic processes. *Geoderma*, 116: 77-88.
- Horn, R.; and H. Fleige. 2009. Risk assessment of subsoil compaction for arable soils in Northwest Germany at farm scale. *Soil and Tillage Research*, 102(2): 201-208.
- Horn, R.; J. Vossbrink; S. Peth and S. Becker. 2007. Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management*, 248(1): 56-63.
- Huang, G.; Q. Chai; F. Feng and A. Yu. 2012. Effects of different tillage systems on soil properties, root growth, grain yield, and water use efficiency of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) in Arid Northwest China. *Journal of Integrative Agriculture*, 11(8): 1286-1296.
- Jat, M. L.; M. K. Gathala; J. K. Ladha; Y. S. Saharawat; A. S. Jat; V. Kumar; S. K. Sharma and R. Gupta. 2009. Evaluation of precision land leveling and double zero-till systems in the rice–wheat rotation: Water use, productivity, profitability and soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 105(1): 112-121.
- Jemai, I.; N. Ben Aissa; S. Ben Guirat; M. Ben-Hammouda and T. Gallalli. 2013. Impact of three and seven years of no tillage on the soil water storage, in th plant root zone, under a dry subhumid Tunisian climate. *Soil and Tillage Research*, 126: 26-33.
- Jones, A.J.; R.A. Wiese and E. C. Dickey. 1989. Management strategies to minimize and reduce soil compaction. *Biological Systems Engineering: Papers and Publications*, 263.
- Jordán, A.; L. M. Zavala and J. Gil. 2010. Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena*, 81(1): 77-85.
- Jury, W. A. and R. Horton. 2004. Soil Physics. Sixth Edition. New Jersey, United states: John Wiley & Sons. 370 p.
- Kaiser, D. R.; M. Fernandes; J. M. Reichert; D. J. Reinert; R. Horn; H. Fleige and A. A. Brandt. 2013. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the subtropics and tropics: a review. *Advances in Geoecology*, 42: 282-337.
- Karlen, D.; J. Kovar; C. Cambardella and T. Colvin. 2013. Thirty-year tillage effects on crop yield and soil fertility indicators. *Soil and Tillage Research*, 130: 24-41.
- Kassam, A.; and T. Friedrich. 2011. Conservation agriculture: principles, sustainable land management and ecosystem services. (pp. 7-9) In Proceedings of the 40th National Convention of the Italian Agronomy Society. Teramo, Italia.
- Katsvairo, T.; W. J. Cox and H. van Es. 2002. Tillage and rotation effects on soil physical characteristics. *Agronomy Journal*, 94: 299-304.



- Kätterer, T.; M.A. Bolinder; O. Andrén; H. Kirchmann and L. Menichetti. 2011. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(1): 184-192.
- Kay, B. D.; and A. J. VandenBygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil and Tillage Research*, 66(2): 107-118.
- Lipiec, J. and R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma*, 116: 107-136.
- Liu, L.; Y. Gan; R. Bueckert; and K. Van Rees. 2011. Rooting systems of oilseed and pulse crops. II: Vertical distribution patterns across the soil profile. *Field Crops Research*, 122(3): 248-255.
- López-Fando, C.; J. Dorado and M. T. Pardo. 2007. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. *Soil and Tillage Research*, 95(1): 266-276.
- Madari, B.; P. Machado; E. Torres; A. Andrade and L. Valencia. 2005. No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from Southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 80: 185–200.
- 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 and Tillage Research*, 99: 232-244.
- Martínez, I.; C. Ovalle; A. Del Pozo; H. Uribe; N. Valderrama; C. Prat and E. Zagal. 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(4): 615-622.
- Martins, M.; J. Cora; R. Jorge and A. Marcelo. 2009. Crop type influences soil aggregation and organic matter under no-tillage. *Soil and Tillage Research*, 104(1): 22-29.
- Melero, S.; R. López-Bellido; L. López-Bellido; V. Muñoz-Romero; F. Moreno; J. Murillo and A. Franzluebbers. 2012. Stratification ratios in a rainfed Mediterranean Vertisol in wheat under different tillage, rotation and N fertilization rates. *Soil and Tillage Research*, 119: 7-12.
- Milleret, R.; R. Bayon and J. Gobat. 2009. Root, mycorrhiza and earthworm interactions: their effects on soil structuring processes, plant and soil nutrient concentration and plant biomass. *Plant and Soil*, 316(1-2): 1-12.
- Morell, F.; J. Lampurlanés; J. Álvaro-Fuentes and C. Cantero-Martínez. 2011. Yield and water efficiency of barley in a semiarid Mediterranean agroecosystem: Long-term effects of tillage and N fertilization. *Soil and Tillage Research*, 117: 76-84.
- Mrabet, R. 2011. Effects of residue management and cropping systems on wheat yield stability in a semiarid Mediterranean clay soil. *American Journal of Plant Sciences*, 2(02): 202-216.
- Mulumba, L. N. and R. Lal. 2008. Mulching effects on selected soil physical properties. *Soil and Tillage Research*, 98(1): 106-111.
- Munkholm, L.; R. Heck and B. Deen. 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil and Tillage Research*, 127: 85-91.
- Olesen, J. E. and L.J. Munkholm. 2007. Subsoil loosening in a crop rotation for organic farming eliminated plough pan with mixed effects on crop yield. *Soil and Tillage Research*, 94(2): 376-385.

- Pittelkow, C. M.; B. A. Linnquist; M. E. Lundy; X. Liang; K. J. Van Groenigen; J. Lee; N. Van Gestel; J. Six; R. T. Venterea and C. Van Kessel. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 183: 156-168.
- Reynolds, W. D.; C. F. 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(3): 252-263.
- Sandoval, M.; J. Dorner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chillán, Chile. 79 p.
- Schoeneberger, P.J.; D.A. Wysocky; E.C. Benham; and W.D. Broderson. 2012. Field book for describing and sampling soils. Version 2.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, Nebraska, USA.
- Seguel, O.; C. Baginsky; A. Contreras; J. I. Covarrubias; C. González and L. Poblete. 2013. Physical properties of a fine textured haplocambid after three years of organic matter amendments management. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 13(3): 690-705.
- Seguel, O.; C. Baginsky; A. Contreras; J. I. Covarrubias; C. González and 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): 287-297.
- Shertzer, G. 2013. Estudio comparativo de sistemas de labranza y rotaciones de cultivos y sus efectos en el rendimiento de trigo y la productividad del suelo. Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Agropecuarias Mención en Producción de Cultivos. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. 70h.
- Silva, P.; I. Matus; R. Madariaga; E. Acevedo. 2011. Criterios técnicos para el manejo de trigo candeal. Santiago, Chile. 52 p.
- Silva, P.; W. Vergara y E. Acevedo. 2015. Rotación de cultivos. (cap. 3, pp. 49-68). En: Ruiz, S. (Ed.). Rastrojo de Cultivos y Residuos Forestales, Programa de Transferencia de Prácticas Alternativas al Uso del Fuego en la Región del Biobío. Chillán, Chile: INIA. 196 p. (Boletín INIA N° 308).
- Singh, A.; V.K. Phogat; R. Dahiya and S. D. Batra. 2014. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice-wheat cropping system. *Soil and Tillage Research*, 140: 98-105.
- Six, J. A.; E. T. Elliott and K. Paustian. 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14): 2099-2103.
- Slafer, G.; D. Miralles; R. Savin; E. Whitechurch y F. González. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento y calidad en trigo. (cap. 7, pp.99-132) En: Satorre, E.; R. Benech; A. Slafer; E. de la Fuente; D. Miralles M. Otegui y R. Savin. Producción de granos. Bases funcionales para su manejo. Buenos Aires, Argentina. 783p.
- Stone, L.R. and A.J. Schlegel. 2010. Tillage and crop rotation phase effects on soil physical properties in the west-central great plains. *Agronomy Journal*, 102: 483-491.
- Strudley, M.; T. Green and J. Ascough. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil and Tillage Research*, 99: 4-48.
- Taylor, H.M. and G.S. Brar. 1991. Effect of soil compaction on root development. *Soil and Tillage Research*, 19: 111-119.

- Tracy, S.; C. Black; J. Roberts and S. Mooney. 2011. Soil compaction: a review of past and present techniques for investigating effects on root growth. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91(9): 1528-1537.
- Trükmann, K.; E. Reintam; J. Kuht and V. Rääts. 2006. Growing of Mugwort (*Artemisia vulgaris* L.), Canadian Thistle (*Cirsium arvense* L.) and Yellow Lupine (*Lupinus luteus* L.) on Compacted Soil. *Advances in Geoecology*, 38: 362-369.
- Uribe, J.M.; R. Cabrera; A. De la Fuente y M. Paneque. 2012. Atlas Bioclimático de Chile. Santiago, Chile. Universidad de Chile. 232p.
- Wang, Y.; J. Xu; J. Shen; Y. Luo; S. Scheu and X. Ke. 2010. Tillage, residue burning and crop rotation alter soil fungal community and water-stable aggregation in arable fields. *Soil and Tillage Research*, 107(2): 71-79.
- Zadoks, J.C.; T.T. Chang and C.F. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stage of cereals. *Weed Research*, 14: 415-421.

## APÉNDICES

Apéndice 1. Separados texturales en profundidad, para las rotaciones de cultivo en los sistemas de cero labranza y labranza convencional

SL	Rotación	Profundidad (cm)	Separados texturales						Textura
			Arena (%)	cv (%)	Arcilla (%)	cv (%)	Limo (%)	cv (%)	
NT	AR	0-2	49,0	19,0	22,0	14,0	29,0	29,0	F
		2-5	45,0	20,0	27,0	13,0	28,0	26,0	FA
		5-15	45,0	26,0	24,0	15,0	31,0	30,0	F
		15-35	46,0	21,0	25,0	34,0	29,0	8,0	F
		35-55	47,0	30,0	28,0	44,0	25,0	19,0	FAa
	HA	0-2	40,0	29,0	26,0	31,0	34,0	12,0	F
		2-5	46,0	25,0	23,0	20,0	31,0	22,0	F
		5-15	43,0	35,0	27,0	56,0	30,0	35,0	FA
		15-35	43,0	28,0	32,0	48,0	25,0	24,0	FA
		35-55	42,0	27,0	28,0	35,0	30,0	7,0	FA
	RA	0-2	42,0	16,0	22,0	21,0	36,0	14,0	F
		2-5	48,0	19,0	20,0	29,0	32,0	14,0	F
		5-15	45,0	18,0	25,0	16,0	30,0	16,0	F
		15-35	41,0	20,0	28,0	25,0	31,0	9,0	FA
		35-55	44,0	25,0	25,0	41,0	31,0	18,0	F
	T	0-2	41,0	5,0	27,0	11,0	32,0	7,0	FA
		2-5	38,0	13,0	28,0	7,0	34,0	10,0	FA
		5-15	38,0	15,0	28,0	12,0	34,0	10,0	FA
		15-35	38,0	13,0	28,0	13,0	34,0	11,0	FA
		35-55	43,0	17,0	30,0	27,0	27,0	6,0	FA
CT	AR	0-15	43,2	4,4	27,0	2,8	29,8	5,0	FA
		15-35	44,7	1,8	26,9	4,7	28,5	2,3	FA
		35-55	48,7	16,8	24,7	19,4	26,6	13,6	FAa
	HA	0-15	45,8	7,9	26,4	11,0	27,7	2,7	FAa
		15-35	41,5	22,9	26,1	8,8	32,4	32,8	F
		35-55	41,9	13,7	27,9	12,6	30,2	9,5	FA
	RA	0-15	45,9	14,2	26,6	15,9	27,5	9,0	FAa
		15-35	44,4	14,3	26,6	15,3	29,0	8,5	F
		35-55	48,6	15,7	24,6	23,5	26,7	8,7	F
	T	0-15	43,1	17,7	28,4	16,8	28,5	12,3	FA
		15-35	42,9	18,8	29,3	17,9	27,8	10,4	FA
		35-55	48,0	35,4	24,8	41,5	27,1	26,6	FAa

Apéndice 2. Fecha se siembra del trigo y la cantidad de días para llegar a los principales estados de desarrollos en los cinco años del estudio.

Año	FS	Em-3 <sup>h</sup> días	Em-Pn días	Em-Esp días	Esp-MF días	Em-MF días
2010	20 de mayo	34	73	130	40	170
2011	24 de mayo	32	51	112	38	150
2012	4 de junio	29	45	108	42	150
2013	23 de mayo	22	43	111	44	155
2014	27 de mayo	29	49	110	38	148

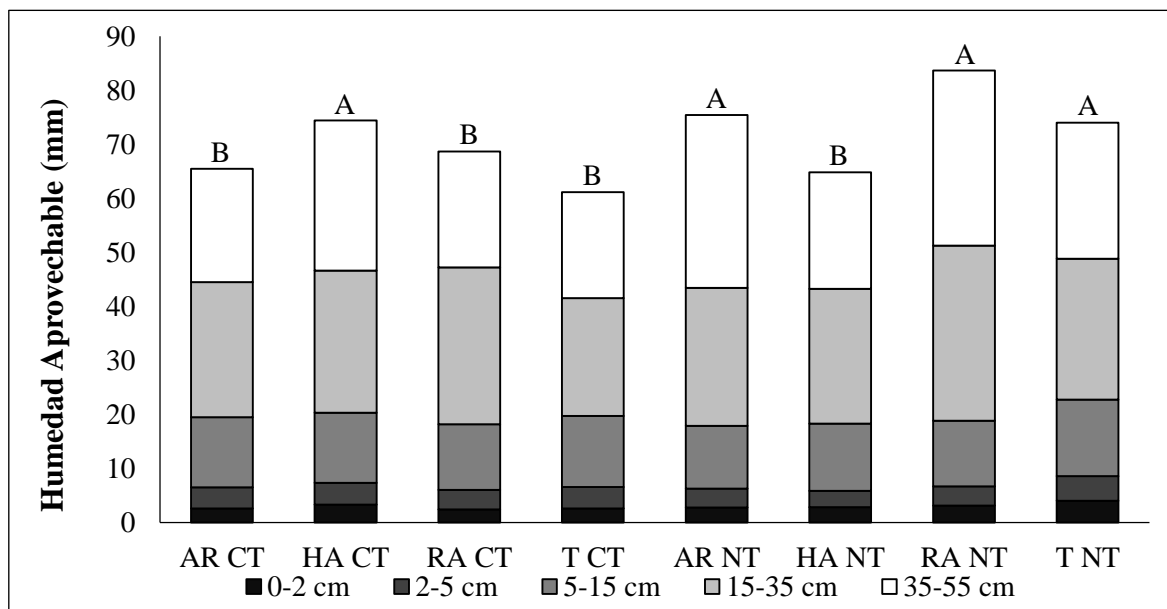
Em: emergencia, 3<sup>h</sup>: tercera hoja completamente expandida, Pn: primer nudo, Esp: Espigadura, MF: madurez fisiológica.

Apéndice 3. Interacción entre los sistemas de labranza y la profundidad de suelo para la densidad aparente.

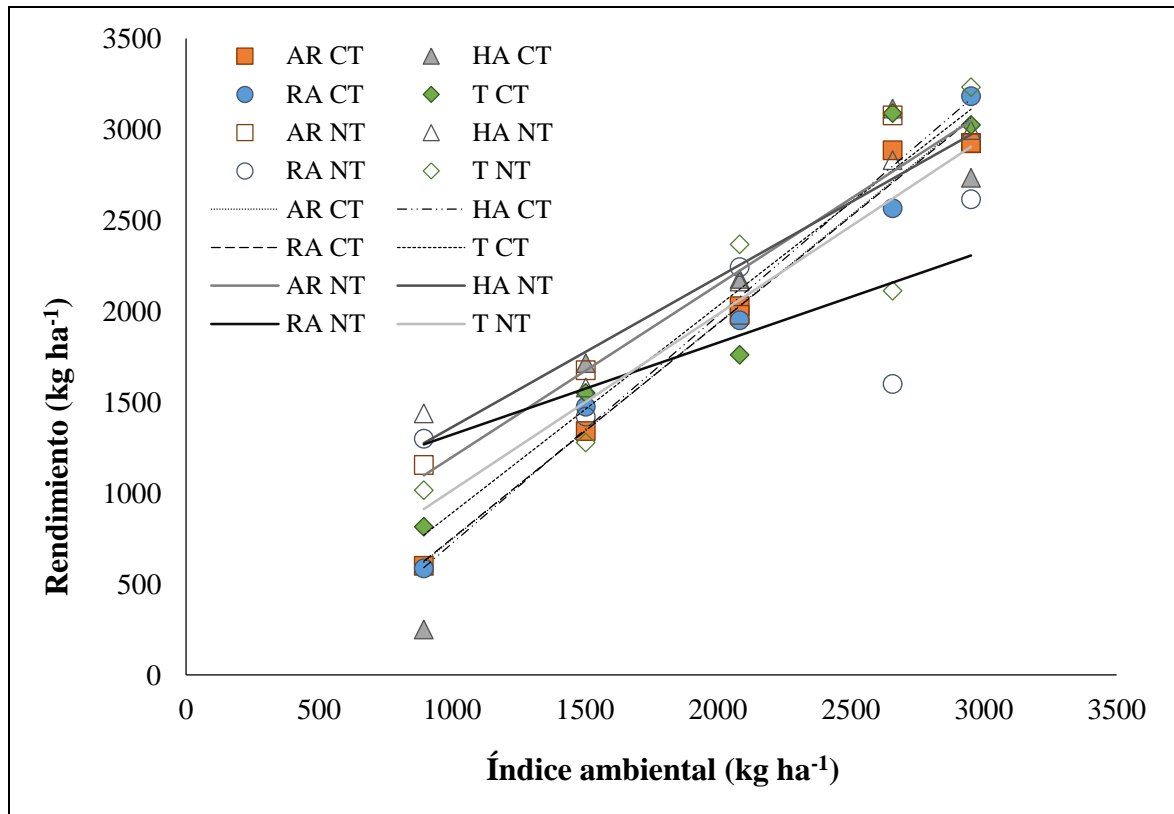
SL	Da (gr cm <sup>-3</sup> )				
	0-2 cm	2-5 cm	5-15 cm	15-35 cm	35-55 cm
CT	1,33 B	1,33 B	1,33 B	1,47 A	1,46 A
NT	1,27 C	1,38 B	1,50 A	1,50 A	1,39 B

SL: sistema de labranza; CT: labranza convencional; NT: Cero labranza. Letras mayúsculas indican diferencias significativas según prueba DGC con un 95% de confianza.

Apéndice 4. Efecto de la rotación de cultivos en la humedad aprovechable (mm) en labranza convencional (CT) y cero labranza (NT); AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo.



Apéndice 5a. Grafico estabilidad de rendimiento por sistema de labranza y rotación de cultivos. CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo



Apéndice 5b. Detalle regresión lineal de la estabilidad de rendimiento por sistema de labranza y rotación de cultivos.

Sistema de labranza	Rotación	Pendiente	R <sup>2</sup>
CT	AR	1,19	0,99
	HA	1,25	0,89
	RA	1,18	0,98
	T	1,14	0,94
NT	AR	0,95	0,94
	HA	0,82	0,96
	RA	0,50	0,56
	T	0,97	0,84

Donde CT: labranza convencional; NT: Cero labranza; AR: rotación trigo-arveja; HA: rotación trigo-haba; RA: rotación trigo-raps; T: rotación trigo-trigo. Pendiente mayor a uno indica rendimientos inestables, pendientes menores a uno indica rendimientos más estables.

## ANEXOS

Anexo 1. Condición climática del año 2010 para los meses entre siembra y madurez fisiológica del cultivo de trigo.

Mes	T° máx. °C	T° mín. °C	T° media °C	Radiación MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Pp. mensual mm	Pp. acumulada mm
mayo	19,9	4,2	12,1	8,43	54	54
junio	15,7	2,0	8,8	6,77	75	129
julio	13,8	-0,3	6,7	7,98	26	155
agosto	16,6	2,4	9,5	10,48	8	163
septiembre	20,2	3,9	12,0	16,42	23	186
octubre	22,6	5,8	14,2	20,12	10	196
noviembre	26,6	8,5	17,6	25,73	34	230

Datos provenientes de estación meteorológica La Platina

Anexo 2. Condición climática del año 2011 para los meses entre siembra y madurez fisiológica del cultivo de trigo.

Mes	T° máx. °C	T° mín. °C	T° media °C	Radiación MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Pp. mensual mm	Pp. acumulada mm
mayo	22,1	3,0	12,5	12,53	1	1
junio	16,6	2,0	9,3	9,26	38	39
julio	15,6	1,8	8,7	8,69	35	75
agosto	15,5	3,5	9,5	9,49	34	109
septiembre	22,8	6,2	14,5	14,53	16	125
octubre	23,8	7,1	15,5	15,47	91	216
noviembre	27,7	8,9	18,3	18,29	0	216

Datos provenientes de estación meteorológica La Platina

Anexo 3. Condición climática del año 2012 para los meses entre siembra y madurez fisiológica del cultivo de trigo.

Mes	T° máx. °C	T° mín. °C	T° media °C	Radiación MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup>	Pp. mensual mm	Pp. acumulada mm
junio	17,1	4,5	10,8	5,62	88	88
julio	16,9	1,4	9,1	6,91	6	94
agosto	16,8	2,7	9,7	7,37	40	134
septiembre	19,5	5,5	12,5	10,98	47	181
octubre	20,3	6,9	13,6	13,42	42	223
noviembre	26,4	9,5	17,9	19,02	0	223

Datos provenientes de estación meteorológica La Platina

Anexo 4. Condición climática del año 2013 para los meses entre siembra y madurez fisiológica del cultivo de trigo.

<b>Mes</b>	<b>T° máx.</b> <b>°C</b>	<b>T° mín.</b> <b>°C</b>	<b>T° media</b> <b>°C</b>	<b>Radiación</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup></b>	<b>Pp. mensual</b> <b>mm</b>	<b>Pp. acumulada</b> <b>mm</b>
mayo	18,9	4,3	11,6	6,24	108	108
junio	18,7	3,0	10,9	5,41	9	117
julio	15,8	2,7	9,3	4,98	3	120
agosto	17,7	2,8	10,3	7,04	35	155
septiembre	18,7	4,5	11,6	9,37	6	161
octubre	23,7	6,6	15,2	13,42	0	161
noviembre	26,6	8,2	17,4	16,45	0	161

Datos provenientes de estación meteorológica La Platina

Anexo 5. Condición climática del año 2014 para los meses entre siembra y madurez fisiológica del cultivo de trigo.

<b>Mes</b>	<b>T° máx.</b> <b>°C</b>	<b>T° mín.</b> <b>°C</b>	<b>T° media</b> <b>°C</b>	<b>Radiación</b> <b>MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup></b>	<b>Pp. mensual</b> <b>mm</b>	<b>Pp. acumulada</b> <b>mm</b>
mayo	19,8	5,4	12,6	8,28	9	9
junio	15,1	2,0	8,6	6,85	89	98
julio	15,8	3,8	9,8	7,59	38	136
agosto	18,7	3,7	11,2	10,88	59	195
septiembre	17,3	5,8	11,5	12,23	28	223
octubre	24,5	8,5	16,5	19,51	0	223
noviembre	25,9	8,7	17,3	22,54	5	229

Datos provenientes de estación meteorológica La Platina