



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

**EFFECTO DE CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA SOBRE LA VARIABILIDAD
TEMPORAL DEL SISTEMA POROSO EN UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL
CULTIVADO CON AVENA**

**EFFECTS OF FOUR TILLAGE SYSTEMS ON THE TEMPORAL VARIABILITY
OF SOIL POROUS SYSTEM IN A MOLLISOL OF CENTRAL CHILE
CULTIVATED WITH OATS**

Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster en
Manejo de Suelos y Aguas

Rodolfo Esteban Torres Carrasco

Directores de tesis

Ian Robin Murray Homer Bannister

Óscar Rodrigo Seguel Seguel

Profesores consejeros

Cristián Eduardo Kremer Fariña

Juan Pablo Fuentes Espoz

Santiago, Chile

2020

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

Efectos de cuatro sistemas de labranza sobre la variabilidad temporal del sistema poroso en un Mollisol de Chile central cultivado con avena

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Título Profesional de Ingeniero Agrónomo y al Grado de Magíster de Manejo de Suelos y Aguas.

RODOLFO ESTEBAN TORRES CARRASCO

DIRECTORES DE TESIS

Calificaciones
(Memoria de título)

Calificaciones
(Tesis de grado)

Ian Robin Murray Homer Bannister
Ingeniero Agrónomo, Dr.

Óscar Rodrigo Seguel Seguel
Ingeniero Agrónomo, Dr.

PROFESORES CONSEJEROS

Cristián Eduardo Kremer Fariña
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.

Juan Pablo Fuentes Espoz
Ingeniero Forestal, Ph. D.

Santiago, Chile
2020

AGRADECIMIENTOS

En este documento no quiero dejar fuera a personas que contribuyeron en todo momento tanto a su realización como ejecución y que por años me han estado acompañando en todos los aspectos de mi vida. Estas son mi mamá María Soledad y mi papá Víctor Rodolfo, los cuales a pesar de todas las dificultades con los que nos hemos enfrentado, jamás me dejaron solo, sino que me ayudaron a levantarme y siempre me han estado enseñando a que todo se consigue con perseverancia, con la mejor disposición posible y manteniendo siempre la humildad para poder las tomar mejores decisiones posibles. Es difícil describir con palabras la infinidad de cosas, el amor y el esfuerzo que han realizado en todo este largo camino que ha sido mi educación y mi vida, todos los momentos que hemos compartido y que seguiremos compartiendo, tanto alegres como tristes, pero que sin duda nos seguirán enriqueciendo como personas y seguirán contribuyendo a mi formación. A ustedes, junto con mis abuelitas Rosa y María que también han estado siempre ahí consintiéndome y regalomeándome en todo con su cariño y amor. Este documento va dedicado para ustedes, los amo mucho y muchas gracias por guiarme en este camino.

A mi hermano Rodrigo que también siempre ha estado ahí alegrando los días con su sonrisa e ideas “distintas”, como los cortes de pelo, viajes a otros países y piercings. A pesar de tener diferencias por temas etarios siempre está acompañándome en la realización de todo tipo de cosas como la vez que fuimos a tomar muestras en Antumapu y ahora este último tiempo en actividades extraprogramáticas nocturnas. Siempre es un apoyo tanto psicológico y moral.

A mi tía Consuelo y toda su familia por siempre acompañarme y enseñarme durante toda mi vida, en todos los momentos que necesité, tanto alegres como tristes, por apoyarme en mi etapa escolar y contribuir a mi formación personal y valórica. Por nunca esperar nada a cambio y tratarme como un hijo más.

A mis otros hermanos de la vida: Gerardo, Camilo, Viviana, Fabián, Felipe, Melina, Cecilia, Chelo, que siempre me han apoyado, aconsejado y contenido en todo momento que necesite, por alegrar mis días de millones de maneras, desde un simple meme hasta sus juntas con canciones de cumbia acompañadas con una cerveza (Quizás un par y muchas más) e incontables tardes hablando de lo que sea, me han ayudado a crecer y formarme como persona en aspectos motrices, sociales y emocionales, permitiéndome cumplir y no decaer en todos los objetivos que me he propuesto a lo largo de los años.

No puedo dejar afuera a mi familia del sur, a todos mis tíos Carrasco los cuales siempre han estado ahí como unos padres, enseñándome todo tipo de cosas e inculcándome valores, buenas conductas y también mostrándome como es realmente el trabajo del campo y el esfuerzo y constancia que hay que ponerle para poder sobrellevar este. También a mis primos (Hermanos): Nicolás, Felipe, Sebastián y Javier, que me han acompañado en todo momento a lo largo de este proceso.

Tampoco me puedo olvidar de todas las personas que conocí dentro de la universidad: María Francisca, Melissa, Andrés, Rene, Gerardo, Carlos, Felipe, Pablo, Kathia, Emilia, Saleth, Tomas y muchos más que con el paso del tiempo, las jornadas recreativas con algunos brebajes (posterior al horario de clases o quizás entre) en los lugares de Antumapu, los viajes a la playa (Pelluhue y San Clemente) se transformaron en amigos y personas muy cercanas que me permitieron poder crecer profesionalmente y pasar muchos buenos e inolvidables momentos dentro de la universidad. También a toda la gente del laboratorio de Física de suelos: Don Hugo, Ricardo, Berthin, Jimmy, por ayudarme a realizar todas las mediciones, con agradables conversaciones, mucha paciencia y risas.

Agradecer también a mis profesores guías Oscar Seguel que desde el minuto uno que nos conocemos, me ha ayudado a mejorar académica, personal y profesionalmente, tratando siempre de que haga las cosas de mejor manera y ayudándome a formarme un criterio con la mayor cantidad de evidencia e información posible para una posterior toma de decisiones. Por intentar que sea menos millennial y por todas sus enseñanzas y conversaciones fuera del ámbito académico que han enriquecido mi estadía dentro de la universidad, por enseñarme a querer el recurso suelo y a ver la agronomía de una manera integral sin descuidar ningún área ni aspecto. Al profesor Ian Homer por tener la mejor disposición de ayudarme cuando he necesitado conseguir información, resolver alguna problemática o ir a tomar muestras al ensayo. También por tener paciencia de explicarme aspectos y detalles de las distintas maquinarias que hay en el taller. Y por su humor y consejos dados a lo largo de las distintas conversaciones en la universidad.

Por último quería escribir un párrafo especial para la persona que ha sido mi mentor dentro de lo que es la agricultura como rubro y como forma de vivir, enseñándome sus distintos aspectos y prácticas (Convencionales y otras no tan convencionales), permitiéndome ver y aprender cómo viven las personas dentro de la agricultura, todo el sacrificio y esfuerzo puesto para lograr cumplir las metas propuestas, por enseñarme a ver y tratar a todas las personas como iguales dentro del “campo”, por todos los consejos dados y esfuerzos realizados. Muchas gracias, Carlos Alberto Carrasco Amigo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
Carbono orgánico en el suelo	1
Sistemas de labranza.....	2
Materia orgánica e indicadores de calidad física del suelo	3
El sistema poroso como indicador de calidad del suelo	4
Cantidad de poros.....	4
Distribución de tamaño de poros	5
Continuidad de poros	5
BIBLIOGRAFIA.....	7
CAPITULO II: RESPUESTA FÍSICA DE UN MOLLISOL ANTE PROCESOS DE TRÁNSITO DE MAQUINARIA BAJO CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA DE CHILE CENTRAL	11
RESUMEN.....	11
ABSTRACT	12
INTRODUCCIÓN	13
OBJETIVOS.....	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
MATERIALES Y MÉTODOS.....	16
Lugar de estudio.....	16
Tratamientos y diseño del experimento	16
Métodos.....	17
Evaluaciones	18
Análisis estadístico.....	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
Caracterización inicial del suelo.	22
Propiedades físicas	22
Contenido de agua.....	22
Densidad aparente	24
Resistencia a la penetración	26
Conductividad hidráulica	28
Mediciones en planta.	30
Fenología.	30
Biomasa.....	32
CONCLUSIONES.....	33
BIBLIOGRAFÍA.....	34

APÉNDICES.....	38
CAPÍTULO III: EFECTO DE CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA SOBRE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DEL SISTEMA POROSO EN UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL CULTIVADO CON AVENA.....	44
RESUMEN.....	44
ABSTRACT.	45
INTRODUCCIÓN.	45
OBJETIVOS.	46
Objetivo general.	46
Objetivo específico.	46
MATERIALES Y MÉTODOS.....	49
Área de estudio.	49
Tratamientos y diseño experimental.....	50
Modelo estadístico	51
Métodos.....	51
Estimaciones de propiedades físicas	51
Contenido de materia orgánica.....	53
Medición de biomasa y rendimiento	53
Análisis estadístico.	53
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
Propiedades físicas	54
Contenido de agua.....	54
Densidad aparente	55
Porosidad total.....	56
Poros de drenaje rápido (PDR) y Poros de drenaje lento (PDL).....	58
Poros de agua útil (PAU)	60
Difusividad de oxígeno	61
Índice de continuidad.....	63
Contenido de materia orgánica	65
Mediciones en planta	67
Biomasa	67
Rendimiento	68
CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFIA.....	71
APÉNDICES.....	76

ÍNDICE DE CUADROS

CAPITULO II: EFECTOS DE CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA SOBRE LA REACCIÓN DEL SUELO FRENTE AL TRÁNSITO EN UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL

Cuadro 1. Sistemas de labranza considerados en el estudio.	17
Cuadro 2. Subparcelas asociadas al factor huella.	17
Cuadro 3. Clase textural del sitio de estudio.	21
Cuadro 4. Distribución del tamaño de poros del sitio de estudio.....	21
Cuadro 5. Contenido de agua (% bv) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza y posiciones de la huella en el terreno.	23
Cuadro 6. Densidad aparente ($Mg\ m^{-3}$) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza y posiciones de la huella en el terreno.	25
Cuadro 7. Resistencia a la penetración (Newton) para los distintos sistemas de labranza en los momentos de Establecimiento del cultivo, Encañado y Cosecha.	26
Cuadro 8. Conductividad hidráulica ($cm\ h^{-1}$) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza y posiciones de la huella al momento del establecimiento del cultivo.	29
Cuadro 9. Promedio de número de tallos, nudos y largo de tallo (cm) para los distintos sistemas de labranza al momento del encañado.	30
Cuadro 10. Promedio de presencia y despliegue de panoja (%) para los distintos sistemas de labranza al momento del encañado.	31

CAPÍTULO III: EFECTO DE CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA SOBRE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DEL SISTEMA POROSO EN UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL CULTIVADO CON AVENA

Cuadro 1. Tratamientos de labranza y equipos utilizados en cada sistema de labranza.	50
Cuadro 2. Subparcelas asociadas al factor huella.	50
Cuadro 3. . Promedio de $Dp/D0$ para NH – H2 a las tensiones 330 y 60 hPa en los 3 momentos de medición.	62

Cuadro 4. Promedio de $Dp/D0$ para H3 en los momentos de Espigadura y Cosecha.	62
Cuadro 5. Promedio de $Dp/D0$ para H3 en las tensiones 330 y 60 hPa.	62
Cuadro 6. Promedio de materia orgánica (%) para los sistemas de labranza en NH y H2 en los 3 momentos de medición en la temporada.	66

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO II: EFECTOS DE CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA SOBRE LA REACCIÓN DEL SUELO FRENTE AL TRÁNSITO EN UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL

- Figura 1. Distribución de puntos de medición en cada parcela, en los momentos del cultivo mencionados anteriormente.18
- Figura 2. Promedios de contenido de agua (%) para la posición de la huella (A) en el momento de encañado y sistemas de labranza (B) al momento de la cosecha. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).
..... 23
- Figura 3. Resultados de fuerza (N) en función de la profundidad. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$) para la interacción huella*profundidad en el momento de Establecimiento del cultivo (A) y Encañado (B). 27
- Figura 4. Resultados de fuerza (N) al momento de cosecha para la posición de la huella (A) y profundidad (B). Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$). 28
- Figura 5. Resultados de biomasa (ton ha^{-1}) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza (A) y posición de la huella (B) en la cosecha. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$) para los sistemas de labranza (A) y posición de la huella (B). 32

CAPÍTULO III: EFECTO DE CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA SOBRE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DEL SISTEMA POROSO EN UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL CULTIVADO CON AVENA

- Figura 1. Ubicación del ensayo dentro de la Región Metropolitana. 49
- Figura 2. Promedio de contenido de agua (%) en los distintos momentos de medición durante la temporada para NH - H2 (A) y para H3 (B). Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$). 54
- Figura 3. Promedio de densidad aparente en NH y H2 (Mg m^{-3}) para los distintos sistemas de labranza durante la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$). 56
- Figura 4. Promedio de porosidad total en NH y H2 (%) para los distintos sistemas de labranza durante la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$). 57

Figura 5. Promedio de PDR en NH y H2 (%) para (A) los distintos sistemas de labranza durante la temporada y para (B) los distintos momentos de medición. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).....	58
Figura 6. Promedio de PDL para NH y H2 (A) y para H3 (B) en los distintos momentos de medición en la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).	59
Figura 7. Promedio de PDL (%) en H3 para los distintos sistemas de labranza. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).	60
Figura 8. Promedio de PAU en NH y H2 (%) para los distintos momentos de medición en la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).	61
Figura 9. Índice de continuidad para NH y H2 en todos los sistemas de labranza en establecimiento, espigadura y cosecha.....	63
Figura 10. Índice de continuidad para H3 en espigadura y cosecha, para los cuatro sistemas de labranza a las tensiones de 60 hPa y 330 hPa.	64
Figura 11. Promedio de biomasa (ton ha^{-1}) cosechada para los distintos sistemas de labranza. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).	68
Figura 12. Promedio de rendimiento cosechado (kg ha^{-1}) obtenido para todos los sistemas de labranza en las zonas de NH y H2. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).	69

CAPÍTULO I: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Carbono orgánico en el suelo

El suelo es el mayor reservorio de carbono orgánico (CO) del mundo, conteniendo 1500 Gt, lo que es aproximadamente el doble de lo que se encuentra en la atmósfera (Schlesinger y Andrews, 2000). A nivel local, el CO en el suelo (COS) es altamente dependiente del manejo, generando un gran impacto en el intercambio de gases entre el suelo y la atmósfera (Melillo *et al.*, 2014). Durante el ciclo de un cultivo, las plantas asimilan dióxido de carbono (CO₂) desde la atmósfera, pudiendo ser fijado en el suelo a través de la incorporación de los residuos de los cultivos en un proceso conocido como secuestro de C (Olson *et al.*, 2014). Durante este proceso, dependiendo del manejo del suelo y las condiciones ambientales, parte del C es liberado a la atmósfera en la forma de gases (CO₂ y CH₄) que contribuyen al efecto invernadero y quedan retenidos en la atmósfera debido a la radiación térmica, contribuyendo al calentamiento global (IPCC, 2014).

Al respecto, los sistemas de labranza resultan cruciales para entender la dinámica del C, pues gracias a las labores de inversión y roturación del suelo se pueden incorporar los residuos frescos de cultivos anteriores (Martínez *et al.*, 2008), lo que permite que hongos y microorganismos edáficos utilicen el C orgánico de estos rastrojos, favoreciendo los procesos de mineralización y secuestro de C (Six *et al.*, 2004). Blanco-Canqui *et al.* (2015) describen distintos manejos que favorecen la captura de CO en el suelo, destacándose la labranza conservacionista (como la cero labranza), la presencia de coberturas vegetales sobre la superficie del suelo y la rotación de cultivos.

Es así que los suelos agrícolas juegan un rol importante en la dinámica del COS, principalmente a través de la acción de la labranza (Lal *et al.*, 1998). Con sistemas de labranza intensivos se producen pérdidas de materia orgánica (MO) en el suelo por efecto de la respiración microbiana y por procesos de erosión (Six *et al.*, 2004). En último término, la calidad y la salud del suelo se ven deterioradas, considerando la relación de la MO con aspectos nutricionales y con las de condiciones físicas del suelo para el enraizamiento de los cultivos y los procesos de flujo (Martínez *et al.*, 2008; Reynolds *et al.*, 2009; Horn y Fleige, 2009). Es así como la pérdida de COS provoca impactos negativos en algunas propiedades físicas como la estructura, densidad aparente, porosidad total y distribución de tamaño de poros, retención de agua y régimen de temperatura del suelo (Lal, 2016). Es así que sistemas de labranza que promuevan la protección y/o acumulación de MO generarán efectos positivos sobre el suelo, favoreciendo así el desarrollo de la biomasa vegetal (Blanco-Canqui *et al.*, 2015).

Sistemas de labranza

Dependiendo de la intensidad y tipo de labranza que se utilice, se pueden provocar pérdidas de COS en el suelo, como en el caso de los sistemas de labranza más intensivos (Reicosky, 2003), destacando dentro de este grupo los métodos de labranza convencional, vertical y rotativa.

La labranza convencional se basa en un conjunto de prácticas que incluyen el uso de arados de inversión, que regularmente realizan una preparación a profundidades de suelo mayores a 20 cm (Ashburner y Simms, 1984; Ortiz-Cañavate, 2003). Este sistema utiliza maquinarias que permiten realizar labores primarias y secundarias, utilizando arados de vertedera o de discos, los cuales son los encargados de roturar e invertir el perfil de suelo (Villa, 1990) y ayudar con la incorporación de restos vegetales, abonos y enmiendas en el terreno, además de controlar malezas de manera mecánica (Martínez *et al.*, 2008). Por su parte, las rastras de discos se utilizan para mullir, mezclar rastrojos de forma superficial y para emparejar el terreno; una alternativa es la rastra de clavos, que se usa para mullir terrones superficiales (Fontaine, 1995). Estas labores se realizan con el objetivo de preparar una adecuada cama de semillas para el establecimiento del cultivo (Acevedo y Silva, 2003).

Por otra parte, la labranza vertical se caracteriza por preparar el suelo con implementos que no invierten el perfil, como el arado de cincel, la rastra de clavos, además de cultivadores y vibrocultivadores con los cuales se rotura el suelo parcialmente, generando un menor impacto con respecto a la labranza convencional (Agostini *et al.*, 2012; Schuler, 2007). Como complemento se puede utilizar un subsolador, que tiene como misión generar un trabajo más profundo (hasta 60 cm), para romper capas endurecidas generadas por causas naturales o por tránsito de la maquinaria (Hamza y Anderson, 2005).

En la labranza rotativa se emplean arados y rastras rotativas, donde se utiliza un rotor conectado al toma de fuerza del tractor, con una cantidad de revoluciones muy superior a la velocidad de avance; este sistema realiza una fuerte intervención sobre el suelo, con un mullimiento más acabado que en los casos anteriores (González *et al.*, 2007). No obstante, de no existir una alta estabilidad de agregados, presentará un asentamiento mayor a los otros sistemas de labranza, dada la mayor porosidad post-labranza (Hartge y Horn, 2016). Es común también encontrar una mezcla entre los sistemas de labranza, donde se realizan labores de aradura con discos o vertederas y, para lograr un buen acabado de la cama de semillas o el camellón de transplante, se utiliza una rastra rotativa (Callejas y Díaz, 2015).

Finalmente, entre los sistemas de labranza menos intensivos y más conservacionistas, destaca la cero labranza, la cual consiste en colocar de manera directa la semilla de los cultivos sobre el suelo, sin remover los residuos del cultivo anterior, realizando una micro preparación exclusivamente en la zona donde irá la semilla, mediante el uso de discos superficiales que rotan paralelos a la dirección de avance del tractor (Acevedo y Silva, 2003). La presencia de rastrojos sobre la superficie favorece la captura de COS y mantiene la capacidad del suelo para ser sumidero de gases de efecto invernadero (Triplett y Dick, 2008). Entre otras ventajas

se cuenta la reducción de las pasadas de maquinaria, minimizando el total de operaciones para la preparación de suelo (Karlen *et al.*, 2013); sin embargo, para esto se utilizan sembradoras con una mayor masa que las sembradoras convencionales, generando un riesgo de compactación superficial (Kayser *et al.*, 2013).

Indistintamente del sistema de labranza, el constante tránsito de maquinaria durante la temporada y año tras año genera compactación en el suelo y en consecuencia una alteración de las funciones del suelo y sus propiedades físicas (Hakansson, 2005), siendo una de las más afectadas la estructura de suelo. Esto provoca que en las zonas de tránsito de maquinaria (huella) se vea disminuida la infiltración de agua y se produzcan aumentos de la densidad aparente y la resistencia a la penetración (Hamza y Anderson, 2005; Osunbitan *et al.*, 2005), lo que dificulta un correcto establecimiento y desarrollo del cultivo a lo largo de la temporada.

Materia orgánica e indicadores de calidad física del suelo

La MO sostiene muchas funciones claves del suelo, afectando, entre otras propiedades la agregación y la formación de estructura (Franzluebbers, 2002; Six *et al.*, 2004), constituyéndose ambas en importantes indicadores de calidad de suelo (Soto *et al.*, 2018), ya que influyen en la productividad y las propiedades físicas de este (Lal, 2016). Para evaluar el impacto de los manejos y los sistemas de labranza, es necesario cuantificar los cambios que ocurren en la estructura del suelo, como una de las propiedades más importantes que afecta la producción de los cultivos, determinando la profundidad de enraizamiento, el contenido de agua que el suelo puede almacenar y el movimiento de aire (Pagliai y Vignozzi, 2002; Gao *et al.*, 2017).

Para cuantificar los cambios en la estructura de un suelo, es posible utilizar mediciones de estabilidad de agregados, conductividad hidráulica y de distribución de tamaños de poros, entre otras; ellas presentan distintas ventajas y limitaciones en función de su representatividad, sensibilidad al manejo, dificultad de medición y variabilidad espacial y temporal (Lipiec *et al.*, 2006; Horn y Fleige, 2009). Por su parte, Horn y Fleige (2003) indican que, al aplicar un estrés externo superior a las fuerzas internas del suelo, este último se compactará, reduciendo la cantidad de poros gruesos, lo que producirá cambios en la funcionalidad y continuidad de estos, afectando negativamente la conductividad del aire dentro del suelo. El mismo proceso es señalado por Osunbitan *et al.* (2005), quienes indican que con la labranza convencional se reduce el número de macroporos y se rompe su continuidad, disminuyendo el movimiento de agua dentro del perfil y con ello la conductividad hidráulica saturada.

Como se mencionó, la variabilidad de algunas propiedades limita la cuantificación de los cambios en la estructura de suelo; dentro de estas destaca la densidad aparente, que varía en función del tiempo como consecuencia de la inestable porosidad generada por la labranza y del efecto acumulado de la lluvia y la gravedad (Alleto y Coquet, 2009; Osunbitan *et al.*,

2005). Propiedades altamente variables del punto de vista espacial son la conductividad hidráulica saturada y la resistencia a la penetración; en el caso de la primera varía mucho de un sitio a otro, ya que depende fuertemente de la estructura, la textura del suelo y el contenido de agua (Dörner y Horn, 2006; Jury y Horton, 2004), mientras que la resistencia a la penetración está relacionada directamente con el contenido de agua y la densidad aparente (Júnior *et al.*, 2006). Es decir, es esperable que todas las propiedades antes mencionadas tengan una alta variabilidad en función de la huella de tránsito. De manera contraria, hay propiedades que presentan una baja variabilidad, como lo es la densidad real, que está relacionada con la mineralogía propia de cada suelo (Sandoval *et al.*, 2012), por lo que no constituye un buen indicador para evaluar el manejo de los suelos.

Debido a las dificultades que se presentan para la interpretación de muchas propiedades del suelo, se han generado valores estándar a nivel mundial para poder comparar y cuantificar indicadores en distintas condiciones. Reynolds *et al.* (2008) fijan algunos rangos óptimos, de manera que si se superan los valores críticos la calidad del suelo se comienza a degradar, en donde destacan: valores de densidad aparente para texturas medias y finas entre los 1,1 y 1,23 Mg m⁻³, macroporosidad entre 9 y 13%, niveles de capacidad de campo entre 30 y 35% y COS entre 3 y 5%.

Los diversos manejos y sistemas de labranza tienen un efecto importante en la dinámica del C, afectando la dinámica de formación de estructura y agregados (Gao *et al.*, 2017). Así, el sobre laboreo degrada y disminuye la calidad física del suelo, generando interacciones y efectos diversos en la relación suelo - planta, de manera que se hace necesario un análisis mucho más acabado, incluyendo otras propiedades físicas importantes como la porosidad, para así realizar una correcta evaluación de la calidad física del suelo (Reynolds *et al.*, 2009).

El sistema poroso como indicador de calidad del suelo

En el suelo, como un sistema trifásico, se producen procesos de transporte y almacenamiento de fluidos y solutos, como son el agua, aire y nutrientes (Hillel, 2004), básicamente a través de la porosidad; este espacio incluye la fase líquida y gaseosa del suelo, pudiendo tener poros llenos con aire o agua (Carter y Gregorich, 2007). Su caracterización se puede realizar mediante la cantidad, distribución de tamaño y continuidad de los poros que la conforman (Pagliai y Vignozzi, 2002).

Cantidad de poros

La cantidad de poros refleja la fracción del volumen total de suelo que es ocupado por el espacio poroso, la cual puede ser estimada en base a la densidad aparente (D_a) y la densidad real (D_r) según la relación $S = 1 - (D_a/D_r)$, donde S es la porosidad total del suelo (volumen de poros/volumen de suelo). Esta se expresa como fracción o porcentaje, tomando valores de 0 a 1 o de 0 a 100, respectivamente (Nimmo, 2013). Esta es una aproximación agronómica

ampliamente conocida, pero para efectos de comparación en términos absolutos se debe usar el número poroso $e = (Dr/Da) - 1$, que corresponde al volumen de poros / volumen de sólidos (Hartge y Horn, 2009). Los valores de S y e dependen de factores como la textura, el ordenamiento de las partículas y los manejos realizados en el suelo, relacionadas principalmente a la Da , pues la Dr es prácticamente constante en el tiempo (Sandoval *et al.*, 2012). En suelos de textura gruesa y mineralogía cristalina, S fluctúa entre 35 y 50%, en texturas finas entre 40 y 60% y en un suelo altamente compactado entre 25 y 30% (Carter y Gregorich, 2007). Por otra parte, sistemas de labranza intensivos generan una consistencia suelta y alta S después de las operaciones de labranza, la cual se va perdiendo rápidamente en la temporada por efecto del asentamiento del suelo (Osunbitan *et al.*, 2005).

Distribución de tamaño de poros

En el suelo, poros menores a 0,5 μm de diámetro se denominan residuales, los que permanecen llenos de agua por una proporción de tiempo mucho mayor que los demás poros, debido a que el flujo en ellos es más lento (Pagliai y Vignozzi, 2002; Pires *et al.*, 2017). Permanecen inactivos biológicamente al no ser penetrados por raíces ni ser habitados por microorganismos, lo que da lugar a que cumplan con su función más importante, la protección física del COS (Warrick, 2002). En el rango entre 0,5 y 50 μm se encuentran los poros de almacenamiento, los cuales incluyen el agua que está disponible para las plantas, junto con proveer de hábitat a la microfauna y microorganismos del suelo (Lal y Shukla, 2004). Finalmente, se reconocen los poros de transmisión, que varían entre 50 y 500 μm (Pagliai y Vignozzi, 2002), los que son influenciados fuertemente por la estructura y el COS, transformándose en los poros más sensibles a los distintos manejos agrícolas (Warrick, 2002); además, son los encargados del drenaje rápido de agua, del flujo de solutos, de la aireación y del desarrollo de raíces en el suelo (Lipiec *et al.*, 2006; Nakajima y Lal, 2014).

Una correcta caracterización de los tamaños de poros se puede realizar a partir de la curva de retención de agua de cada horizonte, ya que la desaturación de los poros es gradual y jerárquica, de mayor a menor tamaño (Hartge y Horn, 2009), permitiendo discriminar manejos (Seguel *et al.*, 2013) y su dependencia con la dinámica del COS (Baginsky *et al.*, 2010).

Continuidad de poros

Esta propiedad está relacionada directamente con la habilidad que tienen los macroporos (>50 μm) de conducir un fluido, de ahí que la continuidad de los macroporos es más importante que su volumen en la determinación del flujo de un fluido (Ball *et al.*, 1988; Zúñiga *et al.*, 2015). Dentro de las propiedades más importantes en las que influye la continuidad de la macroporosidad están la conductividad hidráulica, la infiltración, la difusión de gases y la permeabilidad del aire (Carter y Gregorich, 2007). En el caso de la conductividad hidráulica, la macroporosidad y los canales de raíces contribuyen en gran medida en las funciones de transmisión de agua en el suelo (Dexter *et al.*, 2004; Lipiec y

Hatano, 2003); por ejemplo, Lin *et al.* (1996) reportan que el 10% de los macroporos y mesoporos contribuyen en un 89% al flujo de agua en el suelo, dada la alta dependencia de los procesos de flujo con el radio de los poros (Seguel y Horn, 2006). Por otra parte, Dexter *et al.* (2004) plantean que el corte que generan los equipos de labranza resulta en una discontinuidad del sistema macroporoso, afectando la conductividad hidráulica del suelo.

Se puede estimar la continuidad de los poros mediante un factor Cd determinado por Ball (1981), el cual tiene como base las mediciones de la difusividad relativa de un gas (D/D_o) y la porosidad llena de aire (f_a). Este factor se puede estimar mediante la ecuación 1 y puede alcanzar valores que van entre 0 y 1, correspondiendo a poros completamente bloqueados y poros tubulares rectos alineados con la dirección de difusión del gas, respectivamente.

$$Cd = \frac{D/D_o}{f_a} \times 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

donde D es el coeficiente de difusión de un gas en el suelo y D_o es el coeficiente de difusión en el medio gaseoso.

Teniendo presente estos antecedentes, se hace necesario entender el dinamismo espacial y temporal de propiedades físicas del suelo, referidas a capacidad (poros totales, distribución de tamaño de poro) e intensidad (conductividad hidráulica, difusión de gases), en función de los sistemas de labranza y la presencia o no de la huella de tránsito, como factor clave en la calidad del suelo y su potencial productivo.

BIBLIOGRAFIA

- Acevedo, E., y P. Silva. 2003. *Agronomía de la cero labranza*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Agostini, M., G. Studdert, S. San Martino, J. Costa, R. Balbuena, J. Ressa, 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.
- Alleto, L., and Y. Coquet. 2009. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near – saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. Geoderma. 152: 85 – 94.
- Ashburner, J., y B. Sims. 1984. *Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Baginsky, C.; O. Seguel y A. Contreras. 2010. *Impacto en la utilización de cultivos y enmiendas orgánicas sobre la funcionalidad del suelo*. Santiago, Chile: MAVAL.
- Ball, B.C. 1981. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. Journal of Soil Science. 32: 483–498.
- Ball, B.C., M.F. Osullivan and R. Hunter. 1988. Gas-diffusion, fluid-flow and derived pore continuity indexes in relation to vehicle traffic and tillage. Journal of Soil Science. 39 (3): 327–339.
- Blanco – Canqui, H., T.M. Shaver, J.L. Lindquist, C.A. Shapiro, R.W. Elmore, C.A. Francis, G.W. Hergert. 2015. Cover crops and ecosystems services: Insights from studies in temperate soils. Agronomy Journal. 107 (6): 2449 – 2474.
- Callejas, R., y V. Díaz. (eds.). 2015. *Cultivo de la frutilla con identidad regional: Región del Libertador General Bernardo O’Higgins, Provincia Cardenal Caro*. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 26.
- Carter, M., and E. Gregorich. 2007. *Soil Sampling and Methods of Analysis*. Boca Raton: CRC Press.
- Dexter, A.R., E.A. Czyż, and O.P. Gaę. 2004. Soil structure and the saturated hydraulic conductivity of subsoils. Soil and Tillage Research. 79(2): 185-189.
- Dörner, J., and R. Horn. 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in N Germany. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 169(2): 213–220.
- Fontaine, C. 1995. *Maquinaria Agrícola General*. Universidad de Chile. Santiago, La Pintana, Chile.
- Franzluebbers, A. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. Soil and Tillage Research. 66(2): 197–205.
- Gao, L., E. Becker, G. Liang, A.A. Houssou, H. Wu, X. Wu, D. Cai, and A. Degré. 2017. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon. Geoderma. 288: 97–104.
- González, H., W. Pérez, M. Anaya, C. Restrepo, y A. Toro. 2007. Resistencia al desgaste de cuchillas de arados rotativos en operación en suelos tropicales. Scientia Et Technica. XIII(36): 479-484.

- Hakansson, I. 2005. Machinery-induced compaction of arable soils, incidence – consequences – counter-measures. Swedish University of Agricultural Sciences, Reports from the Division of Soil Management, N° 109.
- Hamza, M., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research. 82: 121-145.
- Hartge, R. und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart.
- Hartge, K. and R. Horn. 2016. Essential Soil Physics: An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics. Ed.: R. Horton; R. Horn; J. Bachmann; St. Peth. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, Germany.
- Hillel, D. 2004. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. USA.
- Horn, R., and H. Fleige. 2003. A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. Soil and Tillage Research. 73(1-2): 89–99.
- 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: 201–208.
- IPCC. 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. The Fifth Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Geneva, Switzerland.
- Júnior, V.V., M.P. Carvalho, J. Dafonte, O.S. Freddi, E. Vidal Vázquez, and O.E. Ingaramo. 2006. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. Soil and Tillage Research. 85(1-2): 166–177.
- Jury, W. and R. Horton. 2004. Soil Physics. 6th Ed. New Jersey. USA.
- 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.
- Kayser, D., M. Rodrigues, J. Riechert, D. Reinert, R. Horn, H. Fleige et al., 2013. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the subtropics and tropics: A review. Advances in Geocology. 42: 282-339.
- Lal, R., J. Kimball, R.E. Follett, and C.V. Cole. 1998. The potential of U.S. cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect, Sleeping Bear Press: Ann Arbor, MI.
- Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. Food and Energy Security. 5(4): 212-222.
- Lal, R., and M.K. Shukla. 2004. Principles of Soil Physics. CRC Press, New York.
- Lin, H.S., K.J. McInnes, L.P. Wilding, and C.T. Hallmark. 1996. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions in a well-structured subsoil. ASAE. 39: 131 – 133.
- Lipiec, J., J. Kuś, A. Słowińska-Jurkiewicz, and A. Nosalewicz. 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. Soil and Tillage Research. 89(2): 210–220.
- Lipiec, J., and R. Hatano. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. Geoderma. 116(1-2): 107–136.
- Martínez, E., J.P. Fuentes, and E. Acevedo. 2008. Carbono orgánico y propiedades del suelo. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. 8(1): 68-96.
- Melillo, J.M., T.C. Richmond, and G.W. Yohe. (Eds). 2014. Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment. U.S. Global Change Research Program.

- Nakajima, T., and R. Lal. 2014. Tillage and drainage management effect on soil gas diffusivity. Soil and Tillage Research. 135: 71–78.
- Nimmo, J. R. 2013. Porosity and Pore Size Distribution, Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Published by Elsevier Inc.
- Olson, K.R., M.M. Al-Kaisi, R. Lal, and B. Lowery. 2014. Experimental consideration treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. Soil Science Society of America Journal. 78(2): 348 - 360.
- Osunbitan, J., D. Oyedele, and K. Adekalu. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. Soil and Tillage Research. 82: 57-64.
- Ortiz-Cañavate, J. 2003. Las máquinas agrícolas y su aplicación. Sexta edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid.
- Pagliai, M., and N. Vignozzi. 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality. pp. 71–82. In: Pagliai M and Jones R (eds.) Sustainable land management - environmental protection—a soil physical approach. Reiskirchen, Germany: Catena Verlag.
- Pires, L.F., J.A.R Borges, J.A. Rosa, M. Cooper, R.J. Heck, S. Passoni, and W.L. Roque. 2017. Soil structure changes induced by tillage systems. Soil and Tillage Research. 165: 66–79.
- Reicosky, D.C., 2003. Tillage-induced CO₂ emissions and carbon sequestration: effect of secondary tillage and compaction. pp: 291–300 In: Garcia-Torres, L., Benites, J., Martinez-Vilela, A., Holgado-Cabrera, A. (Eds.), Conservation Agriculture. Kluwer Acad. Pub., Dordrecht, The Netherlands.
- Reynolds, W.D., C.F. Drury, X.M. Yang, and C.S. Tan. 2008. Optimal soil physical quality inferred through structural regression and parameter interactions. Geoderma. 146(3-4): 466–474.
- 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(3-4): 252–263.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chile: Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. Chillán. (Publicación N° 5).
- Schlesinger, W.H., and J.A. Andrews. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. Biogeochemistry. 48: 7–20.
- Schuler, R. 2007. Residue management: horizontal versus vertical tillage. pp: 179-181. In: Proceeding of the 2007 Wisconsin Fertilizer, Aglime and Pest Management Conference.
- Seguel, O and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting – drying cycles. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 169(2): 221 – 232.
- 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.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research. 79: 7-31.

- Soto, L., M. Galleguillos, O. Seguel, B. Sotomayor, and A. Lara. 2018. Assessment of soil physical properties' status under different land covers within a landscape dominated by exotic industrial tree plantations in south-central Chile. Journal of Soil and Water Conservation. 74(1): 12–23.
- Triplett Jr., G.B., Dick, W.A., 2008. No-tillage crop production: a revolution in agriculture. Agronomy Journal. 100: S153–S165.
- Villa, R. 1990. Máquinas para la labranza primaria de suelo. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Warrick, A. 2002. Soil physics companion. Washington, USA: CRC Press
- Zúñiga, F., J. Ivelic-Sáez, I. López, D. Huygens, and J.F Dörner. 2015. Temporal dynamics of the physical quality of an Andisol under a grazing system subjected to different pasture improvement strategies. Soil and Tillage Research. 145: 233–241.

CAPITULO II: RESPUESTA FÍSICA DE UN MOLLISOL ANTE PROCESOS DE TRÁNSITO DE MAQUINARIA BAJO CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA DE CHILE CENTRAL

RESUMEN

La labranza y el tránsito de maquinaria generan alteraciones en propiedades físicas del suelo relacionadas a capacidad y funcionalidad. En este estudio se evaluó el efecto de cuatro sistemas de labranza (tradicional, cero, rotativo y vertical) sobre propiedades físicas del suelo y sus implicancias en la producción de biomasa de un cultivo de avena (*Avena sativa L.*), basándose en la interacción con la huella de la maquinaria. Se establecieron parcelas de 4x15 m², con cuatro repeticiones. En cada uno de los sistemas de labranza se tomaron muestras en zonas sin tránsito (NH) y en las zonas de tráfico (huellas de maquinarias: Hi), en tres momentos a lo largo de la temporada: establecimiento (H2), encañado (H3) y cosecha (H4), además de muestras del cultivo en encañado para ver el efecto del tránsito de maquinaria. En contenido de agua se encontraron diferencias estadísticas para el factor huella, destacando un mayor valor en H3; en cosecha el efecto fue para el factor labranza, con mayores valores en los sistemas conservacionistas, debido a la presencia de rastrojos en superficie. En la densidad aparente se obtuvieron diferencias para el factor huella en los tres momentos de medición, destacando los menores valores en la zona de no tránsito. La resistencia a la penetración en establecimiento y encañado presentó diferencias para los factores labranza y huella de manera independiente, mientras que en cosecha las diferencias se obtuvieron para profundidad y huella. La mayor conductividad hidráulica la presentó el sistema rotativo. Las muestras del cultivo presentaron diferencias para altura y número de tallos en el factor labranza, donde el sistema rotativo promueve mayor cantidad y altura de tallos. La interacción de factores resulta en producciones de biomasa que dependen tanto del sistema de labranza (mayor en convencional, menor en cero) como del factor huella (No huella > huella), planteando la necesidad de estudiar la continuidad del sistema poroso como factor clave del desarrollo vegetal.

Palabras clave: Propiedades físicas de suelo, huella de tránsito, *Avena sativa*, porosidad.

ABSTRACT

Tillage and machinery transit generate alterations in soil physical properties related to soil capacity and functioning. In this study, the effect of four tillage systems (traditional, zero, rotary and vertical) on soil physical properties and their implications on the biomass production of an oat crop (*Avena sativa L.*) was assessed, based on the interaction with the wheeltrack of the machinery. Plots of 4x15 m² were established, with four replicates. In each tillage systems, soil samples were taken from non-traffic areas (NH) and traffic areas (machinery wheeltracks: Hi), at three times during the cropping season: establishment (H2), 50% cane (H3) and harvest (H4). Also, plant biomass samples were taken during the 50% cane to see the effect of machinery traffic. In terms of water content, statistical differences were found for the wheeltrack factor, with a higher value in H3; at harvest, the effect was for tillage factor, with higher values in conservation systems, due to the amount of stubble on the surface. Differences were obtained in bulk density for the wheeltrack factor at all moments of measurement, highlighting the lower values in non-traffic area. For penetration resistance during establishment and 50% cane, differences were found for the tillage and wheeltracks factors independently, while in harvesting differences were obtained for soil depth and wheeltrack. Hydraulic conductivity was higher in rotative system. Oat plants shown differences for height and number of stems in the tillage factor, where the rotary system promotes greater quantity and height of stems. The interaction of factors results in biomass productions that depend on both the tillage system (higher in conventional, lower in zero) and the wheeltrack factor (NH > H), raising the need to study the continuity of the porous system as a key factor in plant development.

Key words: Soil physical properties, wheel track, *Avena sativa*, porosity.

INTRODUCCIÓN

Debido al creciente incremento y expansión poblacional que se produce en el planeta, la agricultura moderna ha debido adoptar como práctica el uso de un gran número de labores agrícolas realizadas con maquinaria (Karlen *et al.*, 2013), con el objetivo de reducir la carga de trabajo en las personas, además de aumentar la producción y realizar las intervenciones en el momento oportuno (Osunbitan *et al.*, 2005). Una de las principales labores mecanizadas es la labranza, la cual es una alteración física del suelo en la cual se busca desarrollar una condición deseable para la cama de semillas, además de establecer una configuración específica de la superficie para la siembra, riego, drenaje y operaciones de cosecha (Kepner *et al.*, 1978). Sin embargo, teniendo en cuenta los tipos de implementos utilizados para la preparación de suelos, los diversos sistemas de labranza generan efectos diferentes, dependiendo de si buscan favorecer el establecimiento del cultivo o si priorizan la conservación del suelo (Hamza y Anderson, 2005).

La labranza incluye una serie de labores con el fin de preparar el suelo para su posterior siembra, distinguiéndose dos tipos de equipos, los arados y las rastras. Los arados se utilizan sobre el suelo no alterado a modo de labranza primaria, donde se trabaja el suelo en profundidad para lograr una buena zona de desarrollo de las raíces (Ashburner y Simms, 1984). Las rastras desarrollan una labranza secundaria, posterior a la primaria, disgregando y mullendo los primeros centímetros del suelo, para lograr una buena cama de semillas (Ortiz-Cañavate, 2003). Debido a que existen muchos diseños de implementos que tienen distintos roles en la realización de la labranza, es que estos se pueden combinar para la obtención de distintos niveles de intervención del suelo y con esto generar variados tipos de labranza, entre las cuales destacan: Labranza tradicional, vertical y equipos rotativos (Acevedo y Silva, 2003).

La forma más utilizada para preparar el suelo es a través de la labranza convencional, que se basa en un conjunto de prácticas que incluyen el uso de arados de inversión, que regularmente realizan una preparación a profundidades de suelo mayores a 20 cm (Ortiz-Cañavate, 2003). Utiliza maquinarias que permiten realizar labores de manera primaria y secundaria, utilizando arados de vertedera o de discos, los cuales son los encargados de roturar e invertir el perfil de suelo (Villa, 1990) e incorporar restos vegetales, abonos y enmiendas en el terreno, además de controlar malezas de manera mecánica (Sanchez-Giron, 1994). Por su parte, las rastras de discos se utilizan para mullir, mezclar rastrojos de forma superficial y para emparejar el terreno; una alternativa es la rastra de clavos, que se usa para mullir terrones superficiales (Fontaine, 1995).

La labranza vertical tiene un grado de intervención menor en el suelo con respecto a la convencional y con equipos rotativos. En este sistema no se invierte el suelo, pero se rotura a través del arado de cincel en capas profundas, cercanas a los 40 cm (Villa, 1990; Agostini *et al.*, 2012). Como complemento, el subsolador tiene como misión generar un trabajo más profundo (hasta 60 cm), para romper capas endurecidas generadas por causas naturales o

antrópicas (Hamza y Anderson, 2005). En este sistema no existe la posibilidad de incorporar rastros, por lo que queda una cobertura superficial importante.

En el tipo de labranza que emplea arados y rastras rotativas, se utiliza un rotor conectado a la toma de fuerza del tractor, con un número de revoluciones mucho mayor a la velocidad de avance; este sistema realiza una fuerte intervención sobre el suelo, con un mullimiento más acabado que en los casos anteriores, pero de no existir una alta estabilidad de agregados, presentará un asentamiento mayor a los otros sistemas de labranza, dada la mayor porosidad post-labranza (Hartge y Horn, 2016). Normalmente se combinan con implementos de labranza convencional, ya que se realizan labores de aradura con discos o vertederas, y para lograr un buen acabado de la cama de semillas se utiliza una rastra rotativa (Callejas y Díaz, 2015).

Existe un tipo de labranza en la cual no se interviene el suelo y la preparación se reduce a un mínimo. Es la denominada cero labranza, que consiste en colocar de manera directa la semilla de los cultivos sobre el suelo, sin remover los residuos del cultivo anterior y realizando una micro preparación en la zona donde se ubicará la semilla, mediante el uso de discos superficiales que rotan paralelos a la dirección de avance del tractor (Acevedo y Silva, 2003). En este tipo de labranza se utilizan sembradoras de labranza cero, las cuales tienen una gran masa; además, su uso se complementa con equipos de pulverizadoras a presión, cosechadoras y picadoras de rastrojo (equipos chopper o rana), para poder manejar el rastrojo de manera eficiente (Crovetto, 1992; Ruíz, 2015).

Es importante conocer el efecto de los diferentes tipos de labranza y grados de intervención que se realizan en el suelo, ya que afectan directamente la estructura de éste, la cual es una propiedad determinante en la producción de los cultivos, definiendo la profundidad que pueden penetrar las raíces, el agua que puede almacenar el suelo y la renovación del aire hacia las raíces (Hakansson, 2005). Es por esto que se han realizado estudios en los cuales se ha establecido que la realización constante de la labranza lleva a un deterioro de la estructura del suelo, principalmente por pérdida de materia orgánica (Six *et al.*, 2004; Franzluebbers, 2010).

También se debe tener en consideración el efecto que provoca el constante tránsito de maquinaria sobre el terreno, llegando a producir compactación tanto en el suelo como en el subsuelo, provocando una alteración en la distribución del tamaño de poros, principalmente pérdida de poros gruesos, generando cambios en las características de la retención de agua (Dexter, 2004), con incrementos en la densidad aparente y resistencia mecánica y disminución en la conductividad hidráulica (Osunbitan *et al.*, 2005; Martínez *et al.*, 2008; Agostini *et al.*, 2012). Debido a esto, la maquinaria afectará al suelo por efecto del tránsito, provocando una disminución de la infiltración del agua y un aumento de la densidad aparente producto de la compactación, la cual será inicialmente mayor bajo la huella de aquellos sistemas de labranza que generan un mayor mullimiento.

Como hipótesis de trabajo se plantea que el mayor deterioro físico del suelo por efecto del tránsito será en sistemas de labranza con equipos rotativos, lo que afectará negativamente la

germinación de las semillas y en consecuencia ocurrirá una disminución de la producción de biomasa en los lugares donde haya pasado la maquinaria en estados iniciales del cultivo.

En algunos estudios realizados en la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, se han hecho comparaciones entre sistemas de labranza tradicional y cero, dentro y fuera de la huella de tránsito, enfocándose en los momentos característicos del cultivo (Cerdeira, 2012; Faúndez, 2019). Teniendo en cuenta esto, es que en el presente estudio se realiza una comparación del efecto de la huella de tránsito en cuatro sistemas de labranza, analizando la respuesta física del suelo frente a las cargas mecánicas.

OBJETIVOS

Objetivo general

Estudiar el efecto de cuatro sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo y sus implicancias en la producción de biomasa de un cultivo de avena (*Avena sativa* L.), basándose en la interacción con la huella de la maquinaria.

Objetivos específicos

Evaluar el efecto de las zonas de tránsito generada por distintos sistemas de labranza (convencional, vertical, con equipos rotativos y cero) sobre algunas propiedades físicas del suelo, contrastándolas con zonas de no tránsito.

Evaluar el efecto que tendrá la huella de la maquinaria, sobre los estados fenológicos y la producción de biomasa del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODO

Lugar de estudio

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Antumapu, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°40' Sur; 70°38' Oeste) en los terrenos de Mecanización Agrícola, durante la temporada 2017 - 2018. Los análisis de suelo se hicieron en el Laboratorio de Física de Suelos de la misma Facultad.

De acuerdo a la clasificación de Köppen, el sector de estudio se encuentra en la zona de clima templado cálido, con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses y cuyo régimen hídrico presenta precipitaciones invernales de 320 mm y evapotranspiración anual de 1400 mm; la temperatura media anual es de 15,2°C, siendo el mes más cálido enero, con máximas cercanas a los 30°C, y el mes más frío junio, con mínimas de 7,9°C (Santibañez *et al.*, 2017).

Los suelos del sector pertenecen a la Serie Santiago (Mollisol) de origen aluvial, con clase textural franca, descansando sobre un sustrato pedregoso, topografía plana y una pendiente de 1%; de colores pardos rojizos a pardos oscuros, bien drenado y una profundidad efectiva que varía entre los 30 a 75 cm (CIREN, 1996).

El sector de investigación son terrenos que no han sido disturbados ni trabajados por ningún tipo de maquinaria agrícola durante los últimos siete años.

Los equipos de tracción, labranza y siembra disponibles para la realización del ensayo fueron un tractor de 53 HP marca Ford 4130, arado de cincel con 3 cinceles y de 3 metros de ancho, arado de vertedera con dos vertederas, rastra Offset de 18 discos de 20 pulgadas cada uno, rastra rotativa de 2 metros de ancho, una rastra de tipo cultivador y una sembradora Semeato de 11 hileras.

Tratamientos y diseño del experimento

El experimento se realizó con un diseño en bloques completamente aleatorizados con tratamientos con estructura de parcelas divididas, de manera de incorporar dos factores: sistema de labranza (parcela principal) y huella de tránsito (subparcela). Para esto se establecieron 16 parcelas de dimensiones de 4x15 m², distribuidas en cuatro bloques (repeticiones) que fueron separados por caminos de 8 metros, para permitir el paso de la maquinaria entre los bloques. Primariamente en cada bloque se asignó al azar un sistema de labranza, los cuales se detallan en el Cuadro 1. Secundariamente, en cada parcela se individualizaron las huellas de la maquinaria generadas en distintas etapas del manejo del cultivo (Posiciones de la huella), las que se explican en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Sistemas de labranza considerados en el estudio.

Tratamiento	Sistema de labranza	Detalle
LT	Labranza tradicional (LT)	Arado de vertedera + rastra de discos
LV	Labranza vertical (LV)	Arado de cincel + rastra
LR	Labranza con equipos rotativos (LR)	Arado de vertedera + rastra rotativa
LC	Labranza cero (LC)	Siembra directa

La preparación de suelo se realizó 24 horas después de la aplicación de un riego, con el suelo a capacidad de campo. La aplicación del riego se realizó mediante platabanda, considerando la parcela de 4x15 m² (unidad experimental) como la platabanda. En cada parcela se estableció un cultivo de avena (*Avena sativa* L.), la cual fue sembrada el 10 de enero de 2018 mediante sembradora por chorrillo, de manera de analizar el efecto que tiene la huella de la maquinaria en los distintos sistemas de labranza sobre el establecimiento y desarrollo del cultivo.

Las mediciones tuvieron lugar en 3 momentos relevantes del punto de vista de la mecanización: establecimiento del cultivo, encañado y cosecha, siendo estos eventos analizados de manera independiente uno del otro, los cuales tuvieron un muestreo de suelo luego del evento respectivo (Cuadro 2). El muestreo de encañado se realizó posterior al paso de un tractor con una pulverizadora que llevaba 700 litros de agua, simulando la aplicación de agroquímicos, en tanto el muestreo a cosecha se realizó después del paso de una máquina cosechadora de avena sobre cada parcela.

Cuadro 2. Subparcelas asociadas al factor huella.

Huella	Descripción	Nº de pasadas
NH	Fuera de la huella	0
H2	Huella al inicio (establecimiento)	1
H3	Huella a mitad del desarrollo (encañado)	1
H4	Huella pasada al final (cosecha)	1

Métodos

En una primera instancia, se tomaron al azar ocho muestras de suelo, cuatro en la profundidad de 0-15 cm y otras 4 en la profundidad de 15-30 cm con el fin de determinar la homogeneidad del sitio de estudio. Para esto se midió la densidad real, textura y curva característica, todos métodos descritos por Sandoval *et al.* (2012). Luego, al momento de establecer las parcelas principales con los distintos sistemas de labranza, se hicieron las primeras mediciones de contenido de agua, densidad aparente, resistencia a la penetración e infiltración. Estas mediciones fueron realizadas en zonas fuera del paso del tractor (Fuera huella, NH) y donde ocurrió el paso del tractor, dejando su huella en el suelo (H2), a través de cuadrantes de 1 m². Al momento del encañado, se llevó a cabo un paso de maquinaria a través de las parcelas,

generando así la huella H3 en un área distinta, que se midió junto con NH y H2. Finalmente, en la cosecha se hizo el último paso de maquinaria, en el cual se utilizó una cosechadora New Holland Clayson 135, sin carga en la Tolva. En este instante del cultivo, el muestreo se efectuó tanto en las posiciones marcadas anteriormente en la temporada (NH, H2 y H3) como en la huella que se originó con el paso de la cosechadora, generando H4 según se detalla en la Figura 1.

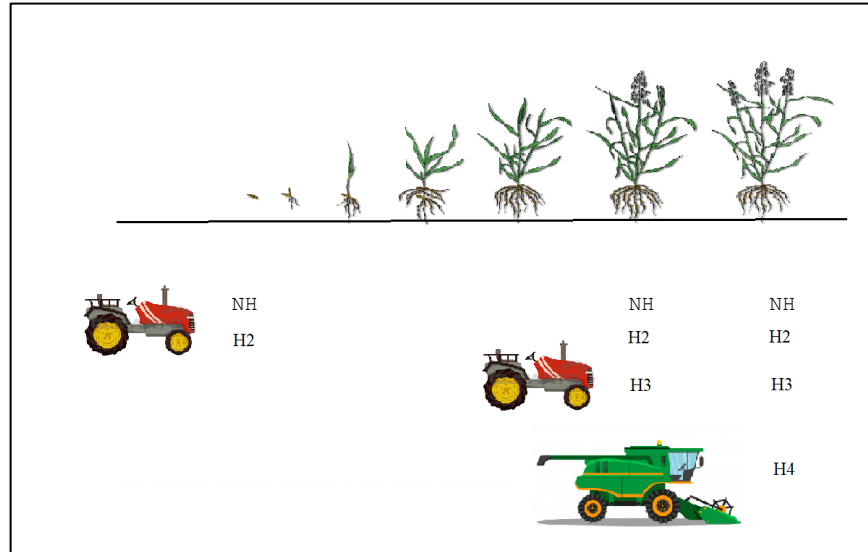


Figura 1. Distribución de puntos de medición en cada parcela, en los momentos del cultivo mencionados en el Cuadro 2.

Evaluaciones

El ensayo se realizó en un periodo de cuatro meses, que corresponde al periodo en que se desarrolló el cultivo.

Propiedades físicas del suelo

Las muestras de suelo fueron tomadas en terreno en los primeros 5 cm del perfil, mediante cilindros de 50 mm de altura y 59 mm de diámetro. Las muestras fueron pesadas y luego secadas en estufa a 105° C durante 24 horas para obtener la masa seca, con la cual se determinó la densidad aparente (D_a) mediante el método del cilindro y el contenido volumétrico de agua (Sandoval *et al.*, 2012). Para estas propiedades se tomó una muestra por tratamiento de huella en cada parcela, totalizando cuatro repeticiones por sistema de labranza.

Mediante un Penetrómetro digital Extech con un centímetro de punta de muestreo, el cual posee un rango de medición de entre 0 y 2200 kPa, se midió la resistencia a la penetración (Bradford, 1986) que tuvo el suelo posterior al paso de la maquinaria. La medición se llevó

a cabo con el suelo a capacidad de campo, realizando 5 submuestreos en cada caso (los cuales se promediaron para tener la repetición respectiva) a las profundidades de 0-2, 2-5 y 5-10 cm.

Finalmente, previo al establecimiento del cultivo se midió la infiltración del agua en el suelo (una medición por unidad de observación, $n=4$), mediante un minidisco infiltrómetro de marca Decagon Devices (Perroux y White, 1988) a tensiones de 1, 2, 4 y 6 hPa. Se utilizó una arena fina como interfase de contacto entre el equipo y la superficie rugosa en el suelo (Angulo-Jaramillo *et al.*, 2000) y se registró la altura de agua infiltrada cada 30 segundos durante un periodo de tiempo de 10 minutos, asegurando alcanzar el equilibrio en la tasa de entrada de agua al suelo. Para el procesamiento de datos se calculó la conductividad hidráulica no saturada de acuerdo al método de Zhang (1997), que considera la geometría del bulbo de mojado en función de la clase textural del suelo. Para el cálculo de la conductividad hidráulica se realizó un ajuste cuadrático de la altura de agua infiltrada en función de la raíz cuadrada del tiempo. Con el coeficiente de curvatura (C_1) del ajuste se calculó la conductividad hidráulica no saturada (K_{ns}) mediante la relación $K_{ns}=C_1/A$, donde A es el parámetro de conexión en función de la clase textural del suelo. Finalmente, con el ajuste de K_{ns} en función de la tensión de medición, se calculó la conductividad hidráulica saturada (K_{sat}) al proyectar el ajuste lineal de los datos a la tensión $h = 0$ hPa.

Efecto del tránsito de maquinaria sobre el cultivo

Para las evaluaciones del cultivo se hicieron mediciones en un metro lineal en cada parcela, delimitado luego de realizar la siembra, con una muestra en la zona sobre la cual pasó el tractor, dejando la huella de una de sus ruedas en el suelo, más una contramuestra en una zona sin tránsito.

En la etapa de encañado (abril de 2018) con el fin de ver el efecto que tuvieron los distintos sistemas de labranza y su interacción con la maquinaria ocupada en distintas prácticas culturales utilizadas a lo largo de la temporada del cultivo, se tomaron 5 plantas por metro lineal, midiéndose el número de tallos, número de entrenudos y largo de estos. Los valores obtenidos se promediaron para tener un valor representativo por parcela. Además, se realizó una evaluación visual sobre la presencia de la panoja en cada tallo de la planta y también si esta se encontraba totalmente desplegada; se obtuvo el promedio porcentual de estas 2 evaluaciones para cada planta y luego para cada parcela.

Finalmente, en la cosecha (mayo de 2018) se midió la biomasa en nuevos sectores de un metro lineal dentro de la parcela, tanto para NH como para H2, debido a que estas consideran el efecto acumulado de toda la temporada, al haber sido generadas desde el primer momento. Luego se pesaron las plantas cosechadas de los cuadrantes y se dejaron en estufa a 65°C durante 3 días, para ser pesados en seco. Esto se realizó con el fin de establecer una comparación entre zonas de tránsito y no tránsito de la maquinaria y posterior a esto entre sistemas de labranza a nivel de parcela.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico se realizó un análisis de varianza (ANDEVA) con un nivel de significancia del 5 %, previa verificación de los supuestos del modelo. En caso de encontrar interacción entre los niveles de los factores (sistema de labranza y huella de la maquinaria), el análisis se realizó comparando los niveles de un factor dentro de cada nivel del otro factor. Por el contrario, de no haber interacción se procedió a evaluar cada factor de manera independiente. Cuando se encontraron diferencias significativas se procedió a realizar la prueba de comparaciones múltiples de LSD de Fisher.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización inicial del suelo

En base al muestreo inicial, se realizó un análisis granulométrico que permitió determinar la textura del suelo (Cuadro 3). La textura determina en gran medida los distintos manejos que se deben realizar en el suelo, dada la cantidad de agua y aire que puede retener y la velocidad con que el agua penetra y circula en este (Warrick, 2002). Según se observa en el Cuadro 3, se determinó que el suelo tanto en superficie como en profundidad es homogéneo, dado que sus porcentajes de arena, limo y arcilla no presentan diferencias estadísticamente significativas y poseen un bajo coeficiente de variación. A partir de estos valores se pudo determinar que la clase textural predominante en el sitio de estudio es Franca (F).

Cuadro 3. Clase textural del sitio de estudio (promedio \pm DS). No se registraron diferencias estadísticamente significativas.

Profundidad cm	A	L (%)	a	Clase textural
0 -15	24,9 (\pm 3,26)	39,1 (\pm 2,56)	36,0 (\pm 4,87)	F
15-30	24,0 (\pm 3,51)	39,0 (\pm 2,67)	37,0 (\pm 5,71)	F

La distribución de tamaño de poros fue obtenida mediante curvas de retención de agua, que fueron generadas al someter muestras no disturbadas a distintas tensiones. Los resultados se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Distribución del tamaño de poros del sitio de estudio. Promedio \pm DS.

Profundidad cm	PDR (>50 μm)	PDL (10-50 μm) (%)	PAU (0,2-10 μm)
0 -15	23,7 (\pm 3,20) a	3,4 (\pm 1,40) a	13,4 (\pm 2,40) a
15 -30	12,2 (\pm 4,50) b	4,4 (\pm 0,80) a	13,7 (\pm 1,70) a

PDR: Poros de drenaje rápido; PDL: Poros de drenaje lento; PAU: Poros de agua útil.

*Letras diferentes en una columna indican diferencias estadísticas significativas entre profundidades para un mismo tamaño de poro.

Los poros de drenaje rápido, también llamados poros gruesos (PDR, $>50 \mu$ m), duplicaron en superficie (0 -15 cm) el valor encontrado en profundidad (15 - 30 cm). Según el criterio señalado por Pagliai (1988) el suelo pasa de ser moderadamente poroso (PDR entre 10 y 25%) en superficie a estar densificado en profundidad, ya que cuenta con valores de PDR cercanos o menores a 10%, lo que indica que se está formando un pie de arado a esa profundidad (Hakansson, 2005). Con respecto a PDL y PAU, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas, por lo que para dichos tamaños de poros el suelo es homogéneo.

Tomando en consideración los datos recopilados en el muestreo realizado al inicio del ensayo, se determinó que la densidad real (Dr) posee un valor de $2,51 \text{ Mg m}^{-3}$ en superficie (0 – 15 cm), mientras que en profundidad (15 - 30 cm) posee un valor de $2,64 \text{ Mg m}^{-3}$. Si bien la literatura indica un valor típico de la Dr de $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ (Warrick, 2002), es esperable que en superficie ese valor sea menor, dado los mayores contenidos de materia orgánica superficial, que tienden a disminuir la Dr del suelo (Sandoval *et al.*, 2012).

La densidad aparente (Da) es una propiedad bastante utilizada como parámetro para evaluar la calidad de un suelo, ya que es un indicador de la estructura, la resistencia mecánica y el estado de compactación que este presenta (Warrick, 2002). Los valores obtenidos en el muestreo inicial fueron de $1,0 \text{ Mg m}^{-3}$ en superficie y $1,48 \text{ Mg m}^{-3}$ en profundidad. Estos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos para las clases texturales francas (Sandoval *et al.*, 2012). La diferencia entre los valores obtenidos en superficie y en profundidad se debe principalmente a que el sitio en estudio no había sido trabajado de manera intensiva durante los últimos siete años, lo que conlleva a una mayor consolidación y valores de densidad aparente que aumentan en profundidad (Schaffer *et al.*, 2010) mientras que en superficie se realizaron algunas labores de rastreo que permitieron mantener el suelo friable y en consecuencia valores de densidad aparente más bajos.

Propiedades físicas post siembra

Se hicieron evaluaciones de las propiedades físicas en tres momentos. La primera fecha de evaluación fue en enero de 2018, periodo en que se preparó el suelo y se realizó la siembra del cultivo. La segunda fecha fue en abril de 2018, periodo en que el cultivo terminó su estado de encañado y la tercera fecha fue el 24 de mayo de 2018, que es donde se cosechó el cultivo.

Contenido de agua

En el Cuadro 5, se pueden apreciar los resultados de contenido de agua (% base volumen) para los cuatro sistemas de labranza, en las cuatro posiciones de huella y para los tres momentos de medición en la temporada. En el establecimiento del cultivo no se detectaron diferencias estadísticamente significativas para la interacción entre los factores, ni entre los factores por separado. Para la medición realizada en encañado solo se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la posición de la huella, mientras que para el momento de la cosecha solo se presentaron diferencias estadísticas para los sistemas de labranza. El detalle del resultado estadístico se presenta en el Apéndice 1 (A, B y C), en tanto la Figura 1 presenta los resultados agrupados según factor significativo.

Cuadro 5. Contenido de agua (% bv) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza y posiciones de la huella en el terreno. Promedio \pm DS.

Sistema de Labranza	Posición huella	Contenido de agua volumétrico (%)		
		Establecimiento	Encañado	Cosecha
Cinzel	Fuera (NH)	11,14 (\pm 3,66)	22,09 (\pm 3,86)	28,18 (\pm 5,00)
	Huella inicial (H2)	13,20 (\pm 3,12)	18,24 (\pm 5,60)	28,46 (\pm 3,75)
	Encañado (H3)	-	26,97 (\pm 2,99)	31,36 (\pm 1,64)
	Cosecha (H4)	-	-	31,99 (\pm 2,21)
Cero	Fuera (NH)	16,26 (\pm 6,63)	23,63 (\pm 3,92)	28,31 (\pm 5,10)
	Huella inicial (H2)	16,31 (\pm 7,53)	20,94 (\pm 6,55)	32,36 (\pm 5,53)
	Encañado (H3)	-	30,20 (\pm 4,02)	32,65 (\pm 2,25)
	Cosecha (H4)	-	-	31,38 (\pm 3,69)
Rotativo	Fuera (NH)	13,95 (\pm 3,46)	21,66 (\pm 5,67)	27,18 (\pm 0,65)
	Huella inicial (H2)	15,39 (\pm 2,58)	21,11 (\pm 2,25)	28,25 (\pm 1,61)
	Encañado (H3)	-	26,17 (\pm 7,79)	29,79 (\pm 3,13)
	Cosecha (H4)	-	-	30,25 (\pm 2,17)
Disco	Fuera (NH)	11,78 (\pm 3,05)	18,17 (\pm 6,74)	26,98 (\pm 3,32)
	Huella inicial (H2)	15,21 (\pm 1,14)	19,06 (\pm 5,59)	25,89 (\pm 2,87)
	Encañado (H3)	-	18,63 (\pm 13,56)	28,58 (\pm 4,37)
	Cosecha (H4)	-	-	27,01 (\pm 4,54)

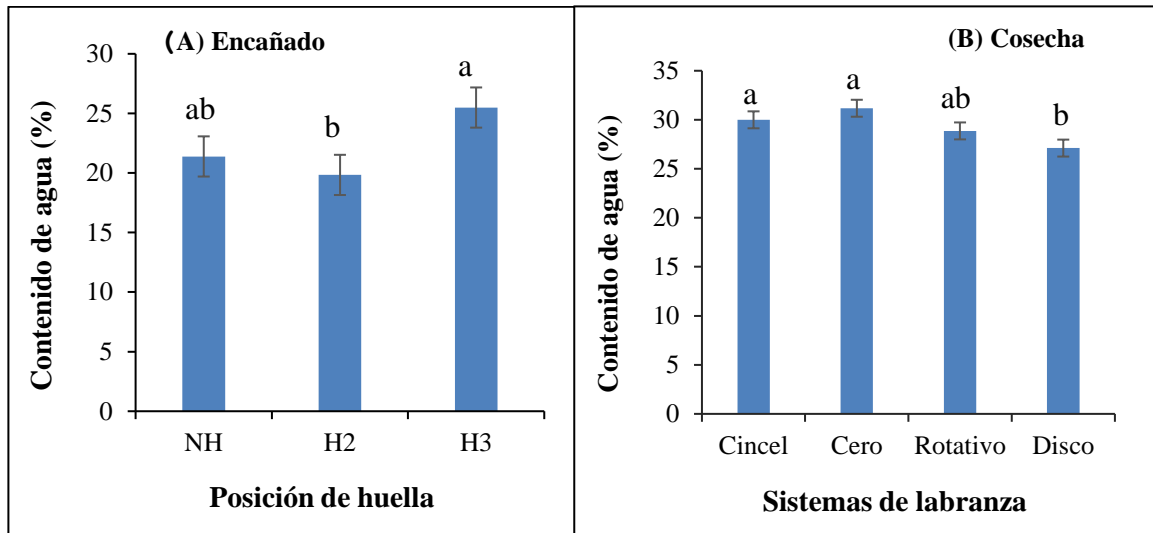


Figura 2. Promedios de contenido de agua (%) para la posición de la huella (A) en el momento de encañado y sistemas de labranza (B) al momento de la cosecha. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Los valores más bajos de contenido de agua se pueden observar al momento del establecimiento del cultivo en todos los sistemas de labranza y posiciones de la huella. Esto

se debe principalmente a que la siembra se realizó en el mes de enero, donde ocurren las máximas temperaturas anuales (Santibañez *et al.*, 2017), sumado a la ausencia de lluvias y de cobertura vegetal, lo que provoca que el contenido de agua volumétrico disminuya drásticamente en los primeros centímetros de suelo (Dörner *et al.*, 2015).

A medida que el cultivo se va desarrollando, los valores de contenido de agua en el suelo van aumentando, encontrándose diferencias estadísticamente significativas para la posición de la huella al momento del encañado, en abril de 2018. Como se puede observar en la Figura 2A, se generaron diferencias estadísticas significativas entre H2 y H3, siendo mayor el contenido de agua en esta última, como consecuencia del paso de la maquinaria justo antes del muestreo, lo que provoca pérdida de poros gruesos, generando que el agua en el suelo se distribuya en menor volumen, dado que la pérdida de volumen se genera a costa de la pérdida de poros con aire (Seguel y Horn, 2006).

Al momento de la cosecha se observaron diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas de labranza, siendo los sistemas menos intensivos, como lo son Cincel y Cero, los que conservan de mejor manera el agua en el suelo en relación a los sistemas convencionales (Martínez *et al.*, 2011). Esto se puede explicar debido a que, en los sistemas más conservacionistas, se mantienen residuos o coberturas vegetales sobre la superficie, disminuyendo la evaporación (Govaerts *et al.*, 2009); también se puede deber a la alta cantidad de microporosidad, que provoca un aumento en la retención de agua en el suelo (Pagliai *et al.*, 1995).

Densidad aparente

En el Cuadro 6 se pueden observar los resultados de densidad aparente (D_a) en función de los cuatro sistemas de labranza y de las cuatro posiciones de huella (NH, H2, H3 y H4), para los tres momentos de medición durante la temporada. No se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la interacción entre los factores y solo se encontraron diferencias para el factor posición de la huella. Estos resultados concuerdan con lo informado en un sitio cercano, donde se compararon valores de D_a entre sistemas de labranza convencional y cero, posterior a 4 y 7 años desde su implementación respectivamente, no encontrándose diferencias significativas entre sistemas de labranza (Martínez *et al.*, 2008); en cambio, el factor tránsito resulta ser el que controla la dinámica de la porosidad, con valores significativamente mayores bajo la huella que fuera de ésta (Alleto y Coquet, 2009). El detalle del resultado estadístico se presenta en el Apéndice 2 (A, B y C).

Cuadro 6. Densidad aparente (Mg m^{-3}) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza y posiciones de la huella en el terreno. Promedio \pm DS.

Sistema de Labranza	Posición huella	Densidad aparente		
		Establecimiento	Encañado	Cosecha
		(Mg m^{-3})		
Cinzel	Fuera (NH)	1,15 (\pm 0,09)	1,04 (\pm 0,08)	1,21 (\pm 0,16)
	Huella inicial (H2)	1,31 (\pm 0,19)	1,13 (\pm 0,25)	1,21 (\pm 0,08)
	Encañado (H3)	-	1,28 (\pm 0,32)	1,29 (\pm 0,06)
	Cosecha (H4)	-	-	1,30 (\pm 0,06)
Cero	Fuera (NH)	1,26 (\pm 0,07)	1,13 (\pm 0,15)	1,21 (\pm 0,22)
	Huella inicial (H2)	1,30 (\pm 0,14)	1,16 (\pm 0,25)	1,34 (\pm 0,12)
	Encañado (H3)	-	1,41 (\pm 0,08)	1,42 (\pm 0,11)
	Cosecha (H4)	-	-	1,32 (\pm 0,08)
Rotativo	Fuera (NH)	1,09 (\pm 0,07)	1,22 (\pm 0,11)	1,27 (\pm 0,08)
	Huella inicial (H2)	1,21 (\pm 0,07)	1,24 (\pm 0,11)	1,24 (\pm 0,02)
	Encañado (H3)	-	1,33 (\pm 0,13)	1,31 (\pm 0,13)
	Cosecha (H4)	-	-	1,36 (\pm 0,13)
Disco	Fuera (NH)	1,12 (\pm 0,04)	1,20 (\pm 0,07)	1,21 (\pm 0,07)
	Huella inicial (H2)	1,27 (\pm 0,13)	1,20 (\pm 0,09)	1,20 (\pm 0,07)
	Encañado (H3)	-	1,25 (\pm 0,21)	1,27 (\pm 0,08)
	Cosecha (H4)	-	-	1,24 (\pm 0,11)
Promedio posición huella		NH 1,16 a*	NH 1,17 a	NH 1,22 a
		H2 1,27 b	H2 1,16 a	H2 1,25 ab
			H3 1,32 b	H3 1,32 b
				H4 1,31 b

Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha < 0,05$) entre posiciones de la huella para un momento del cultivo.

Los rangos de densidad aparente fluctúan entre 1,04 y 1,42 Mg m^{-3} , los que según Alvarado y Forsythe (2005) se encuentran dentro de los rangos normales para un Mollisol. Al momento del establecimiento del cultivo, se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre la zona fuera de la huella (NH) y la zona de la huella del tractor (H2), presentando valores más elevados en H2, dado el rápido asentamiento del suelo que se genera con los sistemas de labranza bajo la acción de cargas externas (Osunbitan *et al.*, 2005; Alleto y Coquet, 2009). Este resultado también puede responder al uso de la sembradora de Cero labranza, ya que posee una mayor masa con respecto a las sembradoras tradicionales, provocando una mayor densificación de las partículas en superficie (Kayser *et al.*, 2013); sin embargo, el sistema de labranza cero prácticamente no presentó diferencias de la Da entre NH y H2.

En la etapa de encañado no se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre NH y H2, pero sí entre estos y H3. Los valores de Da encontrados para los sistemas de labranza Cinzel y Cero muestran una disminución con respecto al muestreo realizado en el establecimiento del cultivo, lo que no coincide con el estudio realizado por Osunbitan *et al.*

(2005), quienes indican que la densidad aparente aumenta con el paso del tiempo. En el caso de los tratamientos Rotativo y Disco, los valores de D_a aumentan hasta desaparecer las diferencias entre NH y H2; esto ocurre debido a que la porosidad generada por las labores de labranza es inestable, disminuyendo con el paso del tiempo por el efecto acumulado de la gravedad y de la lluvia (Alleto y Coquet, 2009). NH y H2 se realizaron cuando el suelo se encontraba seco, mientras que H3 se generó posterior a una lluvia, con el suelo a capacidad de campo, lo que favorece la generación de valores más elevados de D_a , debido a que el suelo es mucho más susceptible a la compactación cuando hay un mayor contenido de agua, ya que este pierde su capacidad de soporte (Hamza y Anderson, 2005; Horn *et al.*, 2007).

Al momento de la cosecha se muestran diferencias significativas entre el sector sin tránsito (NH) y las huellas provocadas en encañado y cosecha (H3 y H4), manteniéndose H2 con niveles intermedios de D_a . Las diferencias se producen nuevamente debido al contenido de agua en que se encontraba el suelo al momento de realizar las pasadas de maquinaria, siendo NH y H2 con el suelo seco, en tanto en H3 y H4 el tránsito se realizó con el suelo húmedo.

Resistencia a la penetración

En el Cuadro 7 se pueden observar los resultados para la resistencia a la penetración (promedio de 0 – 10 cm) por sistema de labranza y en cada momento de medición dentro de la temporada, encontrándose diferencias estadísticamente significativas para los sistemas de labranza; además la Figura 3 presenta la interacción profundidad x posición de la huella, al momento del establecimiento y encañado. Finalmente, en la cosecha se observan diferencias estadísticamente significativas para la posición de la huella y la profundidad por separado, resultados que se presentan en la Figura 4. El detalle del resultado estadístico se presenta en el Apéndice 3 (A, B y C).

Cuadro 7. Resistencia a la penetración (kPa) para los distintos sistemas de labranza en los momentos de Establecimiento del cultivo, Encañado y Cosecha. Promedio \pm DS.

Sistema de labranza	Momento de medición		
	Establecimiento	Encañado	Cosecha
	Resistencia (kPa)		
Cinzel	410,5 (\pm 221,0) a	763,9 (\pm 526,2) a	568,4 (\pm 426,0) ns
Cero	324,2 (\pm 209,2) bc	578,3 (\pm 311,7) b	689,2 (\pm 420,2) ns
Rotativo	317,0 (\pm 161,9) c	853,1 (\pm 585,0) a	613,2 (\pm 440,2) ns
Disco	374,8 (\pm 232,1) ab	838,8 (\pm 561,9) a	654,0 (\pm 490,4) ns

Letras minúsculas diferentes en una columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha < 0,05$) entre sistemas de labranza.

Al momento del establecimiento del cultivo, los mayores valores los presenta la preparación de suelo mediante arado de cinzel junto con el arado de disco, mientras que los menores valores los presenta la Cero labranza y la preparación con equipos rotativos, lo cual no coincide con los resultados observados por Bueno *et al.* (2006), quienes observaron mayores

valores de resistencia en sistemas de Cero labranza, debido a que no hay una alteración mecánica del suelo con respecto a los sistemas de labranza convencional (Salem *et al.*, 2015; Martínez *et al.*, 2008).

En el encañado se observa un aumento en los valores de resistencia, principalmente en los sistemas de labranza Rotativo y Disco, lo que concuerda con lo observado por Osunbitan *et al.* (2005) en donde los sistemas más intensivos aumentan la resistencia a la penetración con el paso del tiempo. En la cero labranza se presentan los menores valores, lo que no coincide con el estudio realizado por Fernandez-Ugalde *et al.* (2009), en el cual este sistema presenta mayores valores con respecto a los sistemas convencionales. En el presente estudio, el mayor contenido de agua posterior a una lluvia pudo generar la menor resistencia a la penetración en el sistema de Cero labranza. A la cosecha, los valores en los sistemas Cincel y Cero continuaron aumentando, en cambio en Rotativo y Disco disminuyeron, lo que generó que los valores de resistencia se igualaran y no presentaran diferencias estadísticas significativas.

En la Figura 3A, se puede apreciar una clara diferencia entre los valores de la zona de no huella y huella, presentando los mayores valores en esta última, debido a que las cargas aplicadas por tractores y sembradoras generan una densificación del suelo, afectando fuertemente la resistencia a la penetración (Zhang *et al.*, 2006). Ambas condiciones aumentan en profundidad debido al peso del suelo sobre yacente (Licht y Al-Kaisi, 2005); en consecuencia, los máximos valores encontrados al momento del establecimiento del cultivo son a los 10 cm de profundidad, aunque en valores no críticos, de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2012).

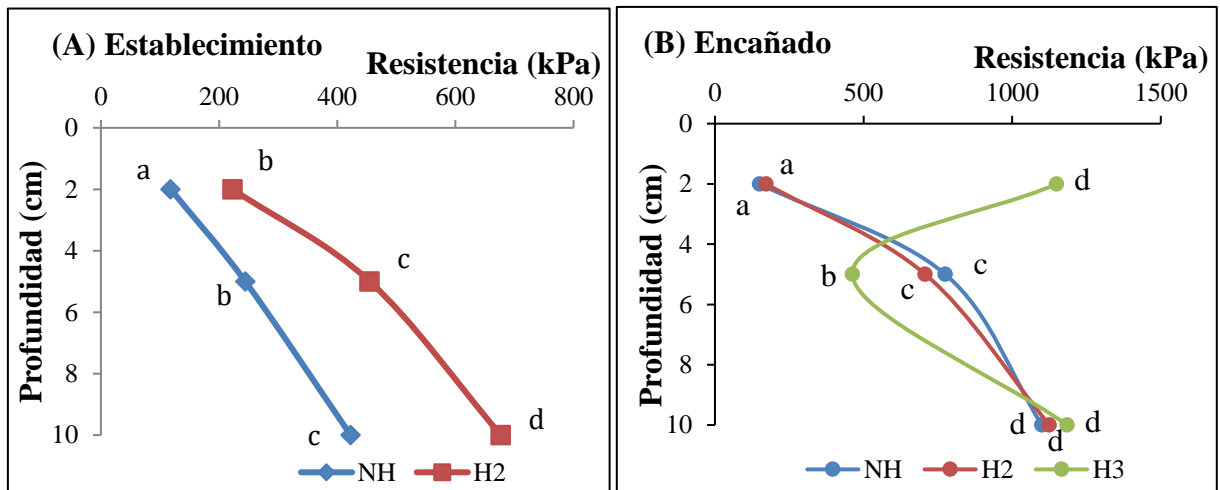


Figura 3. Resultados de resistencia a la penetración (kPa) en función de la profundidad. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$) para la interacción huella*profundidad en el momento de Establecimiento del cultivo (A) y Encañado (B).

En la Figura 3B se puede ver que no hay diferencias entre NH y H2 en ninguna profundidad, pero se aprecia un cambio en el comportamiento de H3, con un aumento significativo de los valores en superficie, alcanzando los valores observados a 10 cm para todas las huellas. En

el caso de lo observado a los 5 cm, se presenta una disminución de la resistencia para H3, obteniéndose el menor valor para esta profundidad, lo que se contradice con lo observado por Horn *et al.* (2007) quienes indican que, en suelos normalmente consolidados, a medida que aumenta la profundidad los valores de resistencia son mayores.

El resultado de la Figura 3B confirma que el suelo, indistintamente de si recibió carga o no, continúa consolidándose en profundidad (en relación con el establecimiento) con los ciclos de humectación y secado provocados por el clima y la absorción de agua del cultivo (Bengough *et al.*, 2011), pero una nueva carga (H3) sin labranza concentrará la presión en superficie, provocando un aumento de la resistencia (Hamza y Anderson, 2005).

Al momento de la cosecha, como se puede apreciar en la Figura 4A, los valores más altos se obtienen en H3, debido a la carga aplicada por el tractor con el pulverizador al momento del encañado, generando una compactación que no se recupera a lo largo de la temporada (Batey, 2009). Sin embargo, aun habiéndose incrementado la densidad aparente en H4 (Cuadro 6), no aumentó la resistencia huella de cosecha, debido a que es una propiedad altamente dependiente de la relación energética del agua del suelo con relación a la proporción de la porosidad saturada (Stock y Downes, 2008). En la Figura 4B se observa el efecto de la profundidad en la resistencia a la penetración, encontrando a mayor profundidad los valores más altos, tal como ha sido ampliamente descrito en la literatura (Horn *et al.*, 2007; Schaffer *et al.*, 2007).

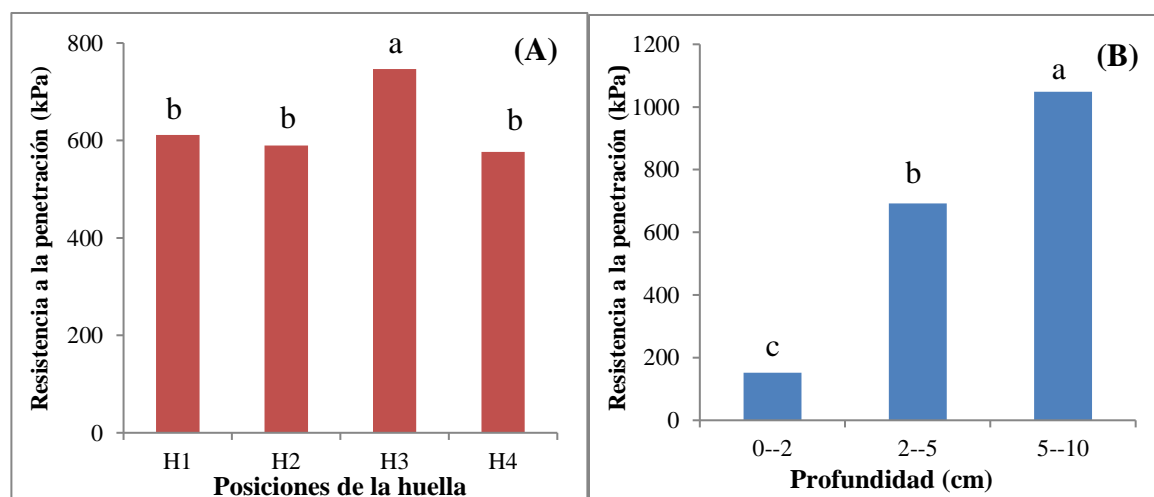


Figura 4. Resultados de resistencia a la penetración (kPa) al momento de cosecha para la posición de la huella (A) y profundidad (B). Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Conductividad hidráulica

En la conductividad hidráulica se encontraron diferencias estadísticamente significativas

para la interacción entre sistemas de labranza x posición de la huella (evaluación realizada en el establecimiento).

Cuadro 8. Conductividad hidráulica saturada (Ks) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza y posiciones de la huella al momento del establecimiento del cultivo.

Sistema de labranza	Posición	
	No huella	Huella
	Ks (cm h ⁻¹)	
Cinzel	1,95 a	2,60 a
Cero	1,77 b	1,71 b
Rotativo	2,05 a	3,29 a
Disco	1,93 b	2,72 a*

Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha < 0,05$) para la interacción sistemas de labranza x huella.

En el Cuadro 8 se pueden observar diferencias estadísticamente significativas para la no huella entre labranza rotativa y cinzel con respecto a labranza cero y de discos. Los valores más altos los presentan el Rotativo y Cinzel con 2,05 y 1,95 cm/h respectivamente. Bhattacharyya *et al.* (2006) compararon el efecto de tres sistemas de labranza (Cero, Mínima y Convencional) obteniendo mayores valores en la Cero labranza, debido a que al no haber una perturbación del suelo mediante equipos de labranza, los macroporos y los canales de raíces no son destruidos, manteniendo la continuidad del espacio poroso (Osunbitan *et al.*, 2005; Cameira *et al.*, 2003), que es uno de los principales factores que condicionan la conductividad hidráulica saturada, relacionada a los cambios de estructura en el suelo (Ellies *et al.*, 1997). En el mismo sitio de estudio de la presente investigación, Martínez *et al.* (2008) determinaron valores de conductividad hidráulica saturada menores en cero labranza en comparación con la labranza convencional, debido a la menor estabilidad mecánica de suelos francos en relación a suelos con alto contenido de arcilla (Reynolds *et al.*, 2002).

En el caso de la huella, se presentan diferencias estadísticas entre la cero labranza y los otros sistemas, siendo el que presenta un mayor valor el sistema de labranza rotativo. Esto es debido a que el arado rotativo genera un mayor mullimiento del suelo, lo que genera un mayor espacio poroso y junto con ello, aumenta la capacidad de conducir agua; sin embargo, este comportamiento depende de la continuidad porosa (Dörner *et al.*, 2015). Aun así, todos los valores, indistintamente de la posición y el sistema de labranza, se encuentran en el rango moderadamente alto de acuerdo con Schoeneberger *et al.* (2012).

Se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre la huella y no huella solo para el sistema de labranza por discos, tomando valores más altos los medidos bajo la huella del tractor, no coincidiendo con lo que indican Sandin *et al.* (2017) en un estudio donde se evaluaron cambios temporales en la porosidad en el suelo posterior a las operaciones de labranza en zonas de tráfico y de no tráfico. En dicho estudio, los resultados de conductividad hidráulica fueron menores en zonas donde ocurrió tráfico de maquinaria, dada la disminución de la conectividad del sistema poroso. Los altos valores de conductividad encontrados en el presente estudio en la zona de huella, puede deberse a que la estabilidad mecánica de la

estructura del suelo es mayor que en la zona de no huella (Alleto y Coquet, 2009), lo que provoca que, al realizarse el tránsito de maquinaria al momento de la siembra, los agregados encajan entre sí, dejando espacio poroso continuo entre ellos.

Mediciones en planta

Fenología

En el caso de la altura de tallo, n° de tallos y n° de nudos / tallo, no se encontró interacción entre los factores, pero se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el factor labranza de manera independiente, mientras que para la posición de la huella no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Para mayor detalle revisar los Apéndices 5 A, B y C.

Las mediciones realizadas en encañado (Cuadro 9) reflejan que el sistema de labranza Rotativo contribuye en mayor medida a producir tallos más altos con respecto a los demás sistemas, alcanzando tallos de hasta 36,9 cm. Silva *et al.* (2004) indican que esto ocurre debido a que el sistema Rotativo genera una mayor porosidad y con ello, aumenta el número de poros llenos de aire en el suelo, generando que el crecimiento del cultivo sea mayor con respecto a los demás sistemas, además de que genera un mullimiento mucho mayor, facilitando la interacción de la semilla con el suelo, provocando una germinación y emergencia más rápida que en los otros sistemas (Acevedo y Silva, 2003).

Cuadro 9. Promedio de largo (cm) y número de tallos y número de nudos/tallo para los distintos sistemas de labranza al momento del encañado.

Sistema de labranza	Largo de tallo cm	N° tallos	N° nudos / tallo
Cincel	27,87 (± 8,97) b	5,13 (± 2,17) ab	3,98 (± 1,01) ab
Cero	20,18 (± 8,70) c	3,75 (± 1,85) b	3,57 (± 1,11) bc
Rotativo	36,92 (± 9,34) a	5,75 (± 3,77) a	4,14 (± 0,56) a
Disco	23,92 (± 7,52) bc	4,46 (± 1,84) ab	3,46 (± 0,56) c

Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha < 0,05$) entre sistemas de labranza.

En el caso del número de tallos, la mayor cantidad también es producida por el sistema Rotativo, con 5,75 tallos, significativamente mayor que el sistema de Cero labranza. En el N° de nudos por tallo los sistemas Rotativo y Cincel son los que más nudos producen por tallo, mientras que la labranza Cero y el sistema por Discos los más bajos. Dado que el sistema rotativo no evidenció una menor densidad aparente (Cuadro 6), relacionado a una mayor porosidad total, la causa de un mejor desarrollo del cultivo al momento de encañado estaría relacionado con un mayor contacto suelo semilla y una menor resistencia mecánica en el establecimiento, lo que asegura una rápida germinación y emergencia (Faiguenbaum, 2003).

En la presencia y despliegue de panoja, se encontró interacción entre los factores sistema de labranza x posición de la huella. Para mayor detalle revisar Apéndices 5 D y E. Como se observa en el Cuadro 10, para la presencia de panoja, en el caso de la zona de huella no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre sistemas de labranza, mientras que para el caso de la no huella, la mayor proporción de panoja se presentó en los sistemas Rotativo y Cincel, incluso con mayor proporción en el sistema Rotativo con relación a todos los casos bajo la huella.

Cuadro 10. Promedio de presencia y despliegue de panoja (%) para los distintos sistemas de labranza al momento del encañado.

Sistema de labranza	Huella	No huella
Presencia de panoja		
(%)		
Cincel	69,15 (\pm 19,74) bc	77,27 (\pm 9,35) ab
Cero	70,19 (\pm 26,77) bc	59,23 (\pm 21,04) c
Rotativo	73,08 (\pm 19,36) bc	90,40 (\pm 7,42) a
Disco	63,97 (\pm 14,40) bc	59,09 (\pm 14,93) c
Despliegue de panoja		
(%)		
Cincel	45,54 (\pm 3,37) bc	41,49 (\pm 16,75) c
Cero	52,83 (\pm 16,46) ab	27,68 (\pm 10,40) b
Rotativo	47,57 (\pm 4,76) bc	60,74 (\pm 6,24) a
Disco	45,83 (\pm 19,58) bc	39,43 (\pm 9,55) c

Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($\alpha < 0,05$) en la interacción sistema de labranza x huella.

En el análisis de despliegue de panoja, en el caso de la huella no hay diferencias entre sistemas de labranza, pero la Cero labranza tiene el mayor porcentaje en relación a la posición fuera de la huella en los sistemas Cincel y Disco, lo que ocurre debido a que en suelos estructurados se transmite y almacena mejor la temperatura (Unger *et al.*, 1982), generando que sus estados de desarrollo sean más rápidos. En el caso de la no huella, el mayor valor fue obtenido en el sistema Rotativo, nuevamente por un posible mejor establecimiento del cultivo, tal como se observó en la presencia de panoja. La menor variación entre sistemas de labranza en posición bajo huella demuestra el efecto homogeneizador del tránsito de maquinaria, en tanto fuera de la huella las diferencias son resultado de la compleja interacción de las variables físicas, por un lado, la relación agua y aire en el sistema poroso, y por el otro el equilibrio entre almacenamiento de calor y resistencia mecánica que afectan el establecimiento de los cultivos (Kayser *et al.*, 2013).

Biomasa

Para la biomasa no se encontró interacción entre los factores, pero sí diferencias estadísticamente significativas para los factores sistema de labranza y posición de la huella de manera independiente. Para mayor detalle ver Apéndice 7.

Como se muestra en la Figura 5A, la mayor cantidad de biomasa cosechada fue en los sistemas de Disco y Rotativo, con 4,3 y 3,31 Ton ha⁻¹ respectivamente, lo que ocurre principalmente porque en el corto plazo los sistemas de labranza convencionales proveen mejores condiciones físicas de suelo para el crecimiento de las plantas (Tormena *et al.*, 2002). La menor cantidad de biomasa fue obtenida en Cero labranza, con 1,44 Ton ha⁻¹, lo que concuerda con resultados obtenidos por Zotarelli *et al.* (2017), en el cual se cosechó Avena negra en el contexto de rotaciones de cultivos bajo sistemas de labranza Convencional y Cero, teniendo la menor cosecha en este último. Esto se explica debido a que en la cero labranza se produce una compactación superficial del suelo, al no haber una preparación mecánica y al utilizarse sembradoras con mayor masa con respecto a las convencionales (Martínez *et al.*, 2008; Kayser *et al.*, 2013).

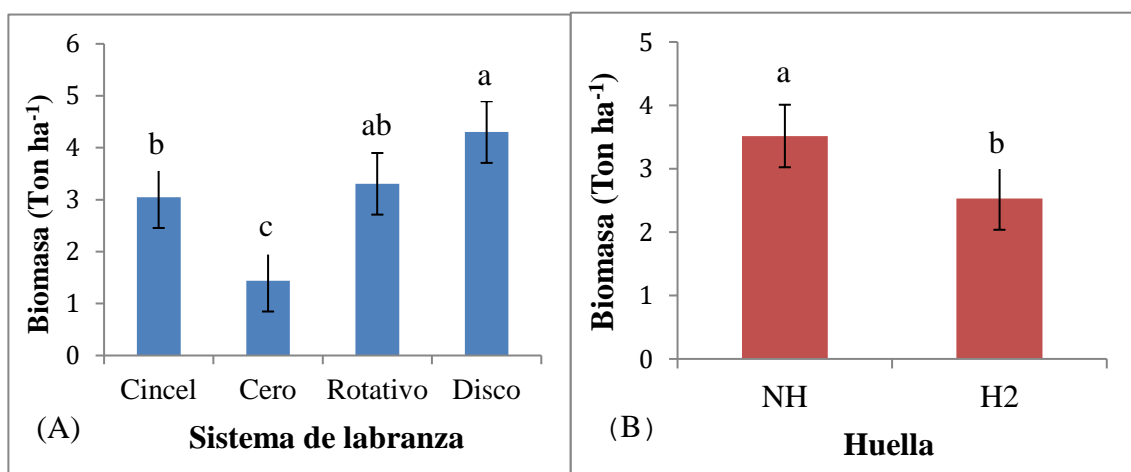


Figura 5. Resultados de biomasa (Ton ha⁻¹) de los tratamientos para los distintos sistemas de labranza (A) y posición de la huella (B) en la cosecha. Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$) para los sistemas de labranza (A) y posición de la huella (B).

En la Figura 5B se aprecia la diferencia entre las zonas de tránsito y no tránsito de maquinaria al momento de la cosecha, obteniéndose mayores valores en esta última, superando la producción por 1 Ton ha⁻¹ aproximadamente a la condición bajo huella. Esto se debe a que en la zona de la huella del tractor aumenta la densidad aparente, reduciendo el volumen de poros (Hamza y Anderson, 2005), lo que provoca un considerable daño en la estructura y en consecuencia en la producción del cultivo y la funcionalidad del suelo (Defosse y Richard, 2002).

CONCLUSIONES

Los sistemas de labranza en un Mollisol de Chile Central generan una respuesta del suelo altamente dependiente de las cargas aplicadas. Así, el contenido volumétrico de agua aumenta en la temporada y presenta valores mayores durante el encañado por efecto del paso de una pulverizadora en relación al tránsito realizado en el establecimiento. A su vez, a la cosecha la labranza de Discos presentó el menor contenido de agua en comparación con los sistemas Conservacionistas (Cero y Cincel).

Por su parte, la densidad aparente se incrementa significativamente en cada momento de medición por efecto del tránsito (sembradora en el establecimiento, pulverizadora en el encañado, cosechadora en maduración) en relación a sectores sin tránsito. Esto resulta en incrementos de la resistencia a la penetración en las mediciones de establecimiento y encañado del cultivo, persistiendo la huella de la pulverizadora hasta la cosecha; también se presentaron diferencias por el sistema de labranza, con los menores valores en el sistema Rotativo al momento del establecimiento y en Cero labranza al momento de encañado.

Dado el asentamiento generado por las cargas mecánicas, el sistema poroso adquiere una alta estabilidad, con los mayores valores de conductividad hidráulica saturada bajo la huella de tránsito respecto a la zona sin tránsito en el sistema tradicional con Disco al momento del establecimiento, y los menores valores en el sistema de labranza Cero, indistintamente de la posición de la huella.

Por otro lado, la mayor altura y producción de tallos se generó en el sistema de labranza Rotativo, producto de un mullimiento mucho más acabado, generando una mayor porosidad, lo que produjo una mejor interacción entre el suelo y la semilla, permitiendo una mejor germinación y emergencia. Esto también se traduce en mayores valores para presencia y despliegue de panoja en zonas de no huella con respecto a zonas de tránsito de maquinaria.

Debido a la cantidad de cargas aplicadas en las zonas de tránsito de maquinaria, se produce una compactación superficial y pérdida de funcionalidad del suelo producto del daño provocado a la estructura, por lo que la mayor producción de biomasa se produjo en las zonas fuera de la huella y en los sistemas de labranza más intensivos, como Disco y Rotativo.

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E., y P. Silva. 2003. *Agronomía de la cero labranza*. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Agostini, M., G. Studdert, S. San 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.
- Alleto, L., and Y. Coquet. 2009. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. Geoderma. 152: 85-94.
- Alvarado, A., W. Forsythe. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Angulo-Jaramillo, R.; J. Vandervaere; S. Roulier; J. Thony; J. Gaudet and M. Vauclin. 2000. Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers: a review and recent developments. Soil and Tillage Research. 55 (1-2): 1-29.
- Ashburner, J., y B. Sims. 1984. *Elementos de diseño del tractor y herramientas de labranza*. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José, Costa Rica.
- Batey, T. 2009. Soil compaction and soil management – a review. Soil Use and Management. 25: 335-345.
- Bengough, A.G., McKenzie, B.M., Hallett, P.D., Valentine, T.A., 2011. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits. Journal of Experimental Botany. 62: 59-68.
- 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(2): 129 – 140.
- Bradford, J.M. 1986. Penetrability. pp: 268-506. In: Klute, A.(ed.) *Methods of soil analysis*. Part 1: Physical and mineralogical methods. Second edition, ASA, SSSA, Madison, Wisconsin.
- Bueno, J., C. Amiama, J.L. Hernanz, and J.M. Pereira. 2006. Penetration resistance, soil water content and workability of grasslands soils under two tillage systems. Transactions of the ASABE. 49(4): 875 – 882.
- Callejas, R., Díaz, V. (eds.). 2015. *Cultivo de la frutilla con identidad regional: Región del Libertador General Bernardo O'Higgins, Provincia Cardenal Caro*. Universidad de Chile, Serie Ciencias Agronómicas N° 26.
- Cameira, M.R., R.M. Fernando, and L.S. Pereira. 2003. Soil macropore dynamics affected by tillage and irrigation for a silty loam alluvial soil in southern Portugal. Soil and Tillage Research. 70(2): 131 – 140.
- Cerda, J. 2012. *Propiedades físicas de suelo bajo y fuera de la huella del tractor en dos sistemas de labranza*. Tesis Ingeniero Agrónomo. Universidad de Chile. Facultad de Agronomía y ciencias agropecuarias. Santiago, Chile.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales Chile). 1996. *Estudio Agrológico Región Metropolitana*. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación N°115 Chile. 425p.

- Crovetto, C. 1992. Rastrojos sobre el Suelo. Una Introducción a la Cero Labranza. Ed. Universitaria San Francisco. Santiago, Chile.
- Defosse, P., Richard, G., 2002. Models of soil compaction due to traffic and their evaluation. Soil and Tillage Research. 67: 41–64.
- Dexter, A.R., 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. Geoderma 120: 201–214.
- Dörner, J.; J. Huertas; J.G. Cuevas; C. Leiva; L. Paulino and J.M. Arumí. 2015. Water content dynamics in a volcanic ash soil slope in southern Chile. Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal. 178(1): 136-145.
- Ellies, A., R. Grez, and C. Ramirez. 1997. La conductividad hidráulica en fase saturada como herramienta para el diagnóstico de la estructura del suelo. AgroSur. 25(1): 51-56.
- Faiguenbaum, H. 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. La Pintana. Santiago. Chile.
- Faúndez, A. 2019. Dinámica de las propiedades hidráulicas de un Mollisol bajo dos sistemas de labranza y la influencia del tránsito de la maquinaria. Tesis en proceso para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo y al grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Santiago, La Pintana, Chile.
- Fernandez – Ugalde, O., I. Virto, P. Bescansa, M.J. Imaz, A. Enrique, and D.L. Karlen. 2009. No – tillage improvement of soil physical quality in calcareous, degradation – prone, semiarid soils. Soil and Tillage Research. 106(1): 29 – 35.
- Fontaine, C. 1995. Maquinaria Agrícola General. Universidad de Chile. Santiago, La Pintana, Chile.
- Franzleubbers, 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.
- Govaerts, B., K.D. Sayre, B. Goudeseune, P. De Corte, K. Lichter, L. Dendooven, and J. Deckers. 2009. Conservation agriculture as a sustainable option for the central Mexican highlands. Soil and Tillage Research. 103: 222 – 229.
- Hakansson, I. 2005. Machinery-induced compaction of arable soils, incidence – consequences – counter-measures. Swedish University of Agricultural Sciences, Reports from the Division of Soil Management, No.109.
- Hamza, M., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research. 82: 121-145.
- Hartge, K. and R. Horn. 2016. Essential Soil Physics: An introduction to soil processes, functions, structure and mechanics. R. Horton; R. Horn; J. Bachmann (Eds.); St. Peth. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller), Stuttgart, Germany.
- Horn, R., K.H. Hartge, J. Bachman, and M.B. Kirkham. 2007. Mechanical stresses in soils assessed from bulk density and penetration resistance data sets. Soil Science Society of America Journal. 71(5): 1455 - 1459.
- 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.
- Kayser, D., M. Rodrigues, J. Riechert, D. Reinert, R. Horn, H. Fleige et al., 2013. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the

- subtropics and tropics: A review. Advances in Geocology. 42: 282-339.
- Kepner, R., R. Brainer, and E. Barger. 1978. Principles of Farm Machinery, third ed. AVI Publishing Company Inc., West Port, CT.
- Licht, M.A., and M. Al – Kaisi. 2005. Strip – tillage effect on seedbed soil temperature and other soil physical properties. Soil and Tillage Research. 80(1-2): 233 – 249.
- Martínez, E., J. 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, M. Sandoval. F. Fernández 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.
- Ortiz-Cañavate, J. 2003. Las máquinas agrícolas y su aplicación. Sexta edición. Editorial Mundi-Prensa. Madrid.
- Osunbitan, J., D. Oyedele, and K. Adekalu. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. Soil and Tillage Research. 82: 57-64.
- Pagliai, M. 1988. Soil porosity aspects. International Agrophysics. 4: 215– 232.
- Pagliai, M., M. Raglione; T. Panini; M. Maletta; M. La Marca. 1995. The soil structure after ten years of conventional and minimum tillage of two Italian soils. Soil and Tillage Research. 34: 209-223.
- Perroux, K. and I. White. 1988. Design for disc permeameters. Soil Science Society of American Journal. 52:1205-1215.
- Ruíz, C. 2015. Rastrojos de cultivos y residuos forestales. Centro Regional de Investigación Quilamapu. Chillán, Chile.
- Salem, H., C. Valero, M.A. Muñoz, M.G. Rodríguez, and L. Silva. 2015. Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. Geoderma. 237: 60-70.
- Sanchez-Giron V. 1994. Aperos de labranza. Vida Rural 7 – 8: 50 – 53.
- Sandin, M., J. Koestel, N. Jarvis, and M. Larsbo. 2017. Post – tillage evolution of structural pore space and saturated and near – saturated hydraulic conductivity in a clay loam soil. Soil and Tillage Research. 165: 161 – 168.
- Sandoval, M.; J. Dörner; O. Seguel; J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chile: Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. Chillán. (Publicación N° 5).
- Santibañez, F., P. Santibañez, C. Caroca y P. González. 2017. Atlas Agroclimático de Chile: Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Universidad de Chile. Santiago, La Pintana, Chile.
- Schäffer, B., P. Boivin and R. Schulin. 2010. Compressibility of repacked soil as affected by wetting and drying between uniaxial compression tests. Soil Science Society of American Journal. 74(5): 1483 – 1492.
- Schoeneberger, P., D. Wysocki, E. Benham and Soil Survey Staff, 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Seguel, O., and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due

- to wetting – drying cycles. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 169(2): 221 – 232.
- Silva, A.P., S. Imhoff, and B. Kay. 2004. Plant response to mechanical resistance and air-filled porosity of soils under conventional and no- tillage system. Scientia Agricola. 61(4): 451-456.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil and Tillage Research. 79: 7-31.
- Stock, O., and N.K. Downes. 2008. Effects of additions of organic matter on the penetration resistance of glacial till for the entire water tension range. Soil and Tillage Research. 99 (2): 191 – 201.
- Tormena, C.A., M.C. Barbosa, A.C.S. Costa, and A.C.A. Goncalves. 2002. Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an oxisol managed by different soil tillage systems. Scientia Agricola. 59: 795–801.
- Unger, P.W., D.M. Van Doren, P.J. Wierenga, D.R. Nielsen, R. Horton and B. Kies. 1982. Tillage effects on soil temperature and thermal conductivity 1. Predicting tillage effects on soil physical properties and processes.
- Villa, R. 1990. Máquinas para la labranza primaria de suelo. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Warrick, A. 2002. Soil physics companion. Washington, USA: CRC Press.
- Zhang, R. 1997. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. Soil Science Society of America Journal. 61: 1024-1030.
- Zhang, X.Y., R.M. Cruse, Y.Y. Sui, and Z. Jhao. 2006. Soil compaction induced by small tractor traffic in Northeast China. Soil Science Society of America Journal. 70(2): 613-619.
- Zotarelli, L., N.P. Zatorre, R.M. Boddey, S. Urquiaga, C.P. Jantalia, J.C. Franchini, and B.J.R. Alves. 2017. Influence of no- tillage and frequency of a green manure legume in crop rotations for balancing N outputs and preserving soil organic C stocks. Field Crops Research. 132: 185 – 195.

APÉNDICES

Apéndice 1 A. Análisis de varianza para el contenido de agua al momento del establecimiento del cultivo.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,01	7	1,6E-03	0,82	0,5811
Sist labra	0,01	3	2,4E-03	1,28	0,3035
Posicion	2,4E-03	1	2,4E-03	1,27	0,2704
Sist labra*Posicion	1,2E-03	3	3,9E-04	0,21	0,8915
Error	0,05	24	1,9E-03		
Total	0,06	31			

Apéndice 1 B. Análisis de varianza para el contenido de agua al momento del encañado.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,06	11	0,01	1,45	0,1945
Posicion	0,03	2	0,01	3,36	0,0460
Sist labra	0,03	3	0,01	2,05	0,1240
Posicion*Sist labra	0,01	6	2,1E-03	0,51	0,7965
Error	0,15	36	4,1E-03		
Total	0,21	47			

Apéndice 1 C. Análisis de varianza para el contenido de agua al momento de la cosecha.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,03	15	1,8E-03	1,48	0,1498
Posicion	0,01	3	2,9E-03	2,33	0,0865
Sist labra	0,01	3	4,8E-03	3,86	0,0149
Posicion*Sist labra	4,6E-03	9	5,1E-04	0,41	0,9244
Error	0,06	48	1,2E-03		
Total	0,09	63			

Apéndice 2 A. Análisis de varianza para la densidad aparente al momento del establecimiento del cultivo.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,19	7	0,03	2,30	0,0604
Sist labra	0,08	3	0,03	2,15	0,1202
Posicion	0,10	1	0,10	8,22	0,0085
Sist labra*Posicion	0,02	3	0,01	0,48	0,6997
Error	0,29	24	0,01		
Total	0,48	31			

Apéndice 2 B. Análisis de varianza para la densidad aparente al momento del encañado.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,43	11	0,04	1,30	0,2626
Posicion	0,25	2	0,13	4,21	0,0227
Sist labra	0,09	3	0,03	0,97	0,4158
Posicion*Sist labra	0,09	6	0,01	0,50	0,8062
Error	1,08	36	0,03		
Total	1,51	47			

Apéndice 2 C. Análisis de varianza para la densidad aparente al momento de la cosecha.**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo.	0,25	15	0,02	1,46	0,1601
Posicion	0,10	3	0,03	2,99	0,0402
Sist labra	0,09	3	0,03	2,47	0,0733
Posicion*Sist labra	0,06	9	0,01	0,61	0,7818
Error	0,55	48	0,01		
Total	0,81	63			

Apéndice 3 A. Análisis estadístico mediante modelos líneas generales mixtos para la resistencia a la penetración al momento del establecimiento del cultivo.**Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)**

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	69	947,72	<0,0001
Labranza	3	69	5,44	0,0021
Prof	2	69	134,51	<0,0001
Posicion	1	69	102,55	<0,0001
Labranza:Prof	6	69	0,74	0,6205
Labranza:Posicion	3	69	1,62	0,1917
Prof:Posicion	2	69	5,70	0,0051
Labranza:Prof:Posicion	6	69	0,38	0,8906

Apéndice 3 B. Análisis estadístico mediante modelos líneas generales mixtos para la resistencia a la penetración al momento del encañado.**Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)**

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	105	212,81	<0,0001
Labranza	3	105	5,40	0,0017
Prof	2	105	51,32	<0,0001
Posicion	2	105	10,20	0,0001
Labranza:Prof	6	105	1,06	0,3935
Labranza:Posicion	6	105	0,36	0,9008
Prof:Posicion	4	105	21,55	<0,0001
Labranza:Prof:Posicion	12	105	0,55	0,8791

Apéndice 3 C. Análisis estadístico mediante modelos líneas generales mixtos para la resistencia a la penetración al momento de la cosecha.**Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)**

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	142	213,52	<0,0001
Labranza	3	142	2,45	0,0659
Prof	2	142	238,30	<0,0001
Posicion	3	142	5,25	0,0018
Labranza:Prof	6	142	0,73	0,6264
Labranza:Posicion	9	142	0,91	0,5189
Prof:Posicion	6	142	0,89	0,5053
Labranza:Prof:Posicion	18	142	0,35	0,9941

Apéndice 4. Promedios para la resistencia a la penetración (kPa), según sistemas de labranza, posición de la huella y momento de medición.

(A)				
Sistema de labranza	Profundidad			Promedio
	0 -2 cm	2-5 cm	5 -10 cm	
NH				
Cincel	130 (± 40)	290 (± 100)	480 (± 40)	300
Cero	90 (± 30)	200 (± 50)	420 (± 110)	230
Rotativo	130 (± 20)	250 (± 30)	380 (± 60)	250
Disco	130 (± 20)	230 (± 50)	420 (± 130)	260
Promedio	120	240	420	
H2				
Cincel	280 (± 80)	510 (± 60)	770 (± 110)	520
Cero	190 (± 50)	420 (± 180)	630 (± 140)	410
Rotativo	200 (± 30)	380 (± 110)	560 (± 170)	380
Disco	210 (± 40)	510 (± 70)	750 (± 180)	490
Promedio	220	460	680	

(B)				
Sistema de labranza	Profundidad			Promedio
	0 -2 cm	2-5 cm	5 -10 cm	
NH				
Cincel	130 (± 60)	790 (± 430)	1210 (± 580)	710
Cero	120 (± 20)	520 (± 110)	790 (± 170)	470
Rotativo	210 (± 130)	960 (± 430)	1300 (± 600)	820
Disco	150 (± 110)	830 (± 370)	1100 (± 530)	690
Promedio	150	780	1100	
H2				
Cincel	130 (± 50)	720 (± 350)	1160 (± 340)	670
Cero	220 (± 60)	560 (± 110)	840 (± 220)	540
Rotativo	130 (± 20)	760 (± 260)	1200 (± 370)	700
Disco	220 (± 180)	790 (± 460)	1300 (± 600)	770
Promedio	170	710	1130	
H3				
Cincel	1350 (± 370)	400 (± 110)	990 (± 240)	910
Cero	920 (± 130)	360 (± 100)	890 (± 200)	720
Rotativo	1050 (± 670)	550 (± 260)	1520 (± 480)	1040
Disco	1280 (± 180)	540 (± 310)	1350 (± 520)	1060
Promedio	1150	460	1190	

(C)

Sistema de labranza	Profundidad			Promedio
	0 -2 cm	2-5 cm	5 -10 cm	
NH				
Cinzel	110 (± 20)	540 (± 140)	1010 (± 500)	550
Cero	190 (± 110)	640 (± 170)	1090 (± 330)	640
Rotativo	100 (± 30)	580 (± 70)	970 (± 270)	550
Disco	150 (± 70)	890 (± 400)	1100 (± 500)	710
Promedio	140	140	660	
H2				
Cinzel	130 (± 40)	500 (± 110)	1060 (± 430)	570
Cero	170 (± 70)	750 (± 150)	1060 (± 210)	660
Rotativo	130 (± 60)	530 (± 120)	840 (± 140)	500
Disco	130 (± 50)	680 (± 340)	1130 (± 490)	650
Promedio	140	620	1020	
H3				
Cinzel	190 (± 90)	690 (± 240)	1160 (± 440)	680
Cero	230 (± 70)	870 (± 130)	1240 (± 160)	780
Rotativo	190 (± 150)	1000 (± 320)	1300 (± 270)	830
Disco	140 (± 40)	830 (± 260)	1130 (± 310)	700
Promedio	190	850	1210	
H4				
Cinzel	190 (± 70)	490 (± 80)	780 (± 190)	490
Cero	190 (± 110)	780 (± 220)	1090 (± 190)	680
Rotativo	90 (± 20)	720 (± 350)	930 (± 320)	580
Disco	140 (± 10)	630 (± 320)	920 (± 500)	560
Promedio	1500	650	930	

Apéndice 5 A. Análisis de varianza para el número de tallo al momento del encañado.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	96,79	7	13,83	2,22	0,0399
Sist. labranza	53,37	3	17,79	2,86	0,0416
Posición	18,38	1	18,38	2,95	0,0894
Sist. labranza*Posición	25,04	3	8,35	1,34	0,2666
Error	548,17	88	6,23		
Total	644,96	95			

Apéndice 5 B. Análisis de varianza para el número de nudos por tallo al momento del encañado.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9,11	7	1,30	1,77	0,1034
Sist. labranza	7,57	3	2,52	3,43	0,0204
Posición	0,35	1	0,35	0,48	0,4891
Sist. labranza*Posición	1,18	3	0,39	0,54	0,6588
Error	64,69	88	0,74		
Total	73,80	95			

Apéndice 5 C. Análisis de varianza para el largo del tallo (cm) al momento del encañado.**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4398,72	7	628,39	8,89	<0,0001
Sist. labranza	3717,74	3	1239,25	17,54	<0,0001
Posición	111,44	1	111,44	1,58	0,2125
Sist. labranza*Posición	569,55	3	189,85	2,69	0,0513
Error	6217,56	88	70,65		
Total	10616,28	95			

Apéndice 5 D. Análisis de varianza para la presencia de panoja (%) al momento del encañado.**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8480,90	7	1211,56	3,87	0,0011
Sist. labranza	5781,64	3	1927,21	6,16	0,0008
Posición	122,90	1	122,90	0,39	0,5325
Sist. labranza*Posición	2720,78	3	906,93	2,90	0,0401
Error	24702,25	79	312,69		
Total	33183,14	86			

Apéndice 5 E. Análisis de varianza para el despliegue de panoja (%) al momento del encañado.**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6918,83	7	988,40	6,46	<0,0001
Sist. labranza	2632,60	3	877,53	5,74	0,0013
Posición	670,86	1	670,86	4,39	0,0394
Sist. labranza*Posición	4084,35	3	1361,45	8,90	<0,0001
Error	12081,57	79	152,93		
Total	19000,40	86			

Apéndice 6. Promedio de N° de tallos, nudos, largo de tallo, presencia de panoja y despliegue de panoja para los distintos sistemas de labranza y las distintas posiciones de huella al momento del encañado.

Sist. labranza	Posic.	N° tallos	N° nudos/tallo	Largo de tallo cm	Presencia Panoja %	Despliegue Panoja %
Cíncel	NH	5,42	4,00	29,35	77,28	51,49
	H2	4,83	4,06	25,71	69,15	45,54
Cero	NH	4,58	3,39	17,77	59,23	27,68
	H2	2,92	3,89	22,65	70,19	52,83
Rotativo	NH	5,42	4,31	40,39	90,42	39,43
	H2	6,08	3,99	38,34	73,08	47,57
Disco	NH	5,50	3,46	24,16	59,09	62,50
	H2	3,50	3,50	23,37	63,97	45,83

Apéndice 7. Analisis de varianza para la biomasa al momento de la cosecha.**Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)**

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	48082568,28	7	6868938,33	6,25	0,0003
Sist. Labranza	33763602,78	3	11254534,26	10,24	0,0002
Posición	7781118,01	1	7781118,01	7,08	0,0137
Sist. Labranza*Posición	6537847,50	3	2179282,50	1,98	0,1435
Error	26385104,68	24	1099379,36		
Total	74467672,96	31			

Apéndice 8. Promedio de Biomasa para cada sistema de labranza y posición de la huella.

Sist. Labranza	Posición	% Húmedad	Biomasa (ton ha ⁻¹)
Cincel	NH	63,97 (± 5,16)	3,70 (± 1,45)
	H2	64,99 (± 7,67)	2,39 (± 0,75)
Cero	NH	67,01 (± 1,35)	1,77 (± 0,95)
	H2	64,28 (± 1,05)	1,11 (± 0,56)
Rotativo	NH	67,19 (± 2,59)	3,18 (± 1,56)
	H2	66,38 (± 10,18)	3,43 (± 0,91)
Disco	NH	68,57 (± 6,30)	5,41 (± 1,17)
	H2	73,41 (± 6,19)	3,19 (± 0,54)

CAPÍTULO III: EFECTO DE CUATRO SISTEMAS DE LABRANZA SOBRE LA VARIABILIDAD TEMPORAL DEL SISTEMA POROSO EN UN MOLLISOL DE CHILE CENTRAL CULTIVADO CON AVENA

RESUMEN

La labranza es uno de los principales factores que afectan a la dinámica del carbono del suelo, produciendo una pérdida de calidad por efectos negativos sobre la estructura. En este estudio se evaluó el efecto de cuatro sistemas de labranza (cero, convencional, rotativo y vertical) sobre el espacio poroso y su relación con la producción de biomasa de un cultivo de avena (*Avena Sativa L.*). Se establecieron parcelas de 4 m x15 m, con tres repeticiones, donde se tomaron muestras en la zona de tráfico (huella de maquinaria) y fuera de esta, en tres momentos a lo largo de una temporada: establecimiento, espigadura y cosecha. Se evaluaron propiedades relacionadas con la estructura del suelo (MO, densidad aparente, distribución de tamaño de poros, difusión de oxígeno y continuidad porosa) en muestras superficiales. Las propiedades estáticas (contenido de agua, distribución de tamaño de poros) dependieron mayoritariamente del factor tiempo (momento de medición en la temporada) y del factor labranza (para el caso de la porosidad y la densidad aparente), no dependiendo del factor huella. Los mejores resultados se encuentran en espigadura (mayor contenido de agua) y cosecha (mayor porosidad de drenaje), aunque el contenido de agua aprovechable disminuyó a lo largo de la temporada. Por otra parte, los sistemas de labranza conservacionista (cincel y cero) presentaron la menor densidad aparente. Las propiedades dinámicas (Índice de continuidad, difusividad de oxígeno, MO), dependen de la interacción entre los tres factores (labranza x huella x tiempo). Para el índice de continuidad, los mayores valores los presentan los sistemas convencionales al momento de espigadura y cosecha; sin embargo, los valores más altos de MO se concentran en los sistemas conservacionistas al momento de espigadura, lo que plantea la necesidad de profundizar los estudios que clarifiquen la relación entre MO, agregación y continuidad de poros.

Palabras claves: Agregación del suelo, porosidad, calidad física de suelo, continuidad porosa, productividad.

ABSTRACT

Tillage is one of the main factor affecting soil carbon dynamics, producing a reduction in soil quality due to negative effects on soil structure. In this study, we assessed the effect of four tillage systems (zero, conventional, rotary and vertical) on the pore space and its relationship with the biomass production of an oat (*Avena Sativa L.*) crop. Plots of 4 m x 15 m were established, with three replicates, where samples were taken outside and in the traffic zone (machinery wheeltrack) at three moments during the season: establishment, heading and harvest. Properties related to soil structure (OM, bulk density, pore size distribution, oxygen diffusion and pore continuity) were evaluated in surface samples. Static properties (water content, pore size distribution) depended mostly on the time factor (time of measurement in the season) and the tillage factor (for the case of porosity and bulk density), not on the wheeltrack factor. The best results are found in heading (highest water content) and harvesting (highest drainage porosity), although the available water content decreased throughout the season. On the other hand, conservation tillage systems (chisel and zero) presented the lowest bulk density. In the case of dynamic properties (continuity index, oxygen diffusivity, OM), they depend on the interaction between the three factors (tillage x wheeltrack x time). For the continuity index, the highest values are presented by the conventional systems at the moment of heading and harvesting; however, the highest values of OM are concentrated in the conservation systems at heading evaluation, which raises the need to continue with studies that clarify the relationship between OM, aggregation and pore continuity.

Key words: Soil aggregation, porosity, soil physical quality, pore continuity, productivity.

INTRODUCCIÓN

Los suelos agrícolas son la mayor reserva de carbono orgánico del planeta, siendo altamente sensibles a los distintos manejos o alteraciones en el suelo, entre las cuales destaca la labranza (Lal *et al.*, 1998). La operación de labranza genera degradación de la estructura, riesgo de escorrentia superficial y erosión de suelo (Martínez *et al.*, 2008). Esto produce pérdidas de materia orgánica (MO) a través de la pérdida de suelo y la respiración microbiana (Six *et al.*, 2004). Las pérdidas de MO disminuyen la calidad y la salud del suelo (Franzleubbers, 2002), debido a que la MO guarda una importante relación con funciones claves, como lo son los aspectos nutricionales y condiciones físicas del suelo, principalmente para el enraizamiento de las plantas y los procesos de flujo (Reynolds *et al.*, 2009; Horn y Fleige, 2009). Es por esto que la pérdida de MO provoca efectos negativos en propiedades físicas como la estructura, densidad aparente, porosidad total, distribución de tamaño de poros y retención de agua (Lal, 2016).

La MO forma parte importante de muchas funciones del suelo, afectando principalmente la agregación y la estabilidad estructural (Franzleubbers, 2002; Six *et al.*, 2004), las que pueden ser utilizadas como indicadores de calidad de suelo, debido a que afectan las propiedades físicas de este (Acevedo y Silva, 2003; Lal, 2016). Así, mediante distintos manejos y sistemas de labranza se pueden generar cambios en la calidad del suelo, afectando propiedades físicas tanto de capacidad como de intensidad o funcionalidad (Reynolds *et al.*, 2009; Gao *et al.*, 2017). Por ende, para evaluar el impacto de los sistemas de labranza, es necesario cuantificar las modificaciones que ocurren en la estructura (Pagliai y Vignozzi, 2002), debido a que ésta se encuentra relacionada directamente con la condición física del suelo, siendo necesario enfatizar en las propiedades más importantes que afectan la producción de los cultivos, como el almacenamiento y movimiento de agua y el flujo de aire en el suelo, para entender de manera más acabada el estado en que éste se encuentra (Dexter, 2004).

Las propiedades de capacidad e intensidad son definidas por Horn y Fleige (2009), quienes indican que en el caso de las primeras se encuentran la porosidad total y el contenido de agua en el suelo, mientras que para las de intensidad destacan la conductividad hidráulica y la difusividad de oxígeno. Si bien las propiedades de capacidad son menos precisas o no prácticas para entender la funcionalidad del suelo, son fáciles de medir e interpretar, no así en el caso de las propiedades de intensidad, que reflejan la funcionalidad del sistema poroso, pero a la vez poseen un alta variabilidad intrínseca, por lo que su interpretación y categorización no siempre es fácil (Jury y Horton, 2004; Schoeneberger *et al.*, 2012).

Los procesos de difusión son importantes para la renovación del oxígeno hacia el sistema de raíces, por lo que se ven afectados por la acción de la labranza y el tráfico de maquinaria, ya que éstos alteran la estructura de suelo, provocando una disminución de la macroporosidad, con una reducción en la aireación del suelo producto de la compactación (Ball y Robertson, 1994; Dörner *et al.*, 2012). Es por esto que para poder cuantificar de mejor manera los cambios provocados por los diferentes sistemas de labranza en el sistema poroso y el efecto que estos tendrán en la aireación del suelo, se han generado índices que definen la

continuidad de poros. Un índice de continuidad ampliamente aceptado es el que resulta del cociente entre la difusividad de oxígeno (D_p/D_0) y la porosidad llena de aire (e), e indica qué tan hábiles son los poros para conducir oxígeno (Ball *et al.*, 1988). La utilización de este índice proporciona información sobre la conectividad de la red porosa, teniendo relación directa sobre la funcionalidad de la estructura del suelo, como una eficiencia en el proceso de difusión, a diferencia de la mera cuantificación de tamaño de poros, que en sí mismo indica la capacidad volumétrica del sistema poroso del suelo, sin relacionarse con su funcionalidad (Horn y Fleige, 2009).

Como se mencionó anteriormente, los procesos de almacenamiento y conducción en el suelo se ven afectados por los distintos sistemas de labranza y por el tránsito de maquinaria, ya que estos factores alteran la estructura del suelo, principalmente por compactación y por pérdida de continuidad del sistema poroso, lo que repercute en alteraciones en la distribución de tamaño de poros y la renovación de agua y aire hacia las raíces a nivel de perfil de suelo (Dexter, 2004; Hakansson, 2005). Por lo tanto, resulta interesante evaluar los aspectos dinámicos de estos cambios, ya que durante la temporada de desarrollo de un cultivo se producen eventos relacionados a la mecanización que alteran de manera dramática la porosidad del suelo.

HIPÓTESIS

Los sistemas intensivos de labranza en comparación a los sistemas conservacionistas provocan una disminución del espacio poroso a lo largo de la temporada en un cultivo de cereal en Chile central, lo que se acrecienta bajo la huella del tractor.

Predicciones

- Se espera que haya una alteración más drástica del sistema poroso a lo largo de la temporada en suelos donde se usaron sistemas de labranza más intensivos, con respecto a otros más conservacionistas.
- En las zonas de tránsito de la maquinaria se espera un impacto más negativo en la continuidad y funcionalidad de los poros que en las zonas sin tráfico de maquinaria.

OBJETIVOS

Objetivo general

Evaluar y comparar el efecto de cuatro sistemas de labranza (cero, vertical, con equipo rotativo y convencional) sobre el espacio poroso del suelo y su impacto en la producción de biomasa de un cereal de invierno.

Objetivos específicos

- Evaluar los cambios provocados en el espacio poroso del suelo en 3 momentos importantes durante el cultivo de un cereal, desde el punto de vista de la mecanización.
- Evaluar el efecto de los sistemas de labranza en función del impacto de la huella y la materia orgánica como determinantes de la calidad del sistema poroso.
- Evaluar la biomasa y rendimiento de un cultivo de avena (*Avena sativa* L.) en función de la mecanización durante la temporada.

MATERIALES Y MÉTODO

Área de estudio

El ensayo se realizó en la Estación Experimental Antumapu, de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile (33°40' S; 70°38' O) en los terrenos de Mecanización Agrícola (Figura 1), durante la temporada de invierno - primavera 2019. Los análisis de propiedades físicas y químicas se realizaron en los laboratorios de Física de Suelos y Química de Suelos y Agua respectivamente.



Figura 1. Ubicación del ensayo dentro de la Región Metropolitana.

De acuerdo a la clasificación de Köppen, el sector de estudio se encuentra en la zona de clima templado cálido, con una estación seca prolongada de 7 a 8 meses y cuyo régimen hídrico presenta precipitaciones invernales de 350 mm y evapotranspiración anual de 1400 mm. La temperatura media anual es de 15,2°C, siendo el mes más cálido enero, con máximas cercanas a los 30 °C, y el mes más frío junio, con mínimas del orden de 8 °C (Santibañez *et al.*, 2017).

Los suelos del sector pertenecen a la Serie Santiago, miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esqueletal, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls. Son de origen aluvial, ligeramente profundos, con clase textural franca; presentan topografía plana (pendientes cercanas a 1%) y colores pardo rojizos a pardo oscuros; son bien drenados y poseen una profundidad efectiva entre los 30 y 75 cm (CIREN, 1996).

El sector de investigación cuenta con terrenos que fueron trabajados la temporada anterior (2017 – 2018), en los cuales se establecieron parcelas con un cultivo de avena (*Avena sativa* L.) en base a 4 sistemas de labranza. Posterior a la cosecha, se incorporaron los rastrojos y se dejó el suelo en condición de barbecho durante lo que restó del año 2018 y durante el

verano de 2019.

Para la implementación de los tratamientos se contó con un tractor de 53 hp (Ford 4130), arados de cincel de 3 m de ancho, arado de vertedera de dos cuerpos, rastra offset de 18 discos de 20 pulgadas cada uno, rastra rotativa de 2 m de ancho y una sembradora de 11 hileras (Semeato).

Tratamientos y diseño experimental

El experimento se realizó con un diseño completamente aleatorizado con estructura de tratamientos de parcelas subdivididas, de manera de incorporar dos factores: sistema de labranza (parcela principal) y huella de tránsito (subparcela), las cuales contaron con 3 tratamientos. Se establecieron 12 parcelas de dimensiones de 5 x 15 m² que fueron separadas por caminos laterales de 2 m. Inicialmente, en cada parcela se asignaron los sistemas de labranza al azar (Cuadro 1). Posteriormente, en cada parcela se individualizaron las huellas de maquinaria generadas en diferentes etapas del manejo del cultivo que reflejaron o no zonas de tránsito de maquinaria (Posiciones de la huella), lo que se explica en el Cuadro 2.

Cuadro 1. Tratamientos de labranza y equipos utilizados en cada sistema de labranza.

Tratamiento	Sistema de labranza	Detalle
LT	Tradicional (LT)	Arado de vertedera + rastra de discos
LV	Vertical (LV)	Arado de cincel + rastra de clavos
LR	Con equipos rotativos (LR)	Arado de vertedera + rastra rotativa
LC	Cero (LC)	Siembra directa

Cuadro 2. Subparcelas asociadas al factor tránsito.

Huella	Descripción	Nº de pasadas
NH	Zona sin tránsito de maquinaria	0
H2	Huella al inicio (establecimiento del cultivo)	1
H3	Huella a mitad del desarrollo (espigadura)	1

Cada subparcela tuvo un área de 1 m² y fue muestreada en 3 momentos importantes del cultivo, desde el punto de vista de la mecanización: establecimiento del cultivo (posterior a la siembra), en espigadura y a la cosecha. En el establecimiento del cultivo se generaron NH y H2, debido al paso del tractor para las labores de siembra, representando zonas sin tránsito a modo de control (NH) y de tránsito de maquinaria (H2), respectivamente. En estas se midieron propiedades como: materia orgánica, porosidad total, densidad aparente, curva característica y difusividad de oxígeno en todos los muestreos realizados a lo largo del desarrollo del cultivo. También se midió la densidad real solo en ese primer momento. Posteriormente, en espigadura se generó H3 por el paso del tractor junto con un pulverizador con 700 litros de agua, simulando labores de aplicación de agroquímicos; en este momento fueron medidas NH, H2 y H3, al igual que al momento de la cosecha.

Las mediciones se realizaron entre el 4 de Junio de 2019 y terminaron al momento de la cosecha del cultivo, el 8 de Enero de 2020.

Modelo estadístico

El modelo estadísticamente propuesto para el desarrollo del ensayo es el siguiente:

$$Y_{ijkl} = u + L_i + H_j + T_k + (LH)_{ij} + (LT)_{ik} + (HT)_{jkt} + (LHT)_{ijk} + PP_l + Sp_j + \epsilon_{ijkl}$$

En este modelo, Y es la propiedad por analizar; los factores independientes L, H y T representan a los sistemas de labranza, huella de la maquinaria y tiempo en que se toman las muestras, respectivamente. Estos van acompañados de subíndices: i representa los sistemas de labranza a utilizar, tomando valores que van del 1 al 4; j indica la zona definida como sin huella y dos tipos de huellas que se está midiendo, por lo que toma valores de 1 a 3, y k muestra el momento en que se está analizando la muestra dentro de la temporada, tomando valores de 1 a 3.

Las interacciones de los factores quedan representadas por LH, LT, HT y LHT, mientras que PP es la parcela principal que va acompañada de un subíndice l que indica la cantidad de parcelas a analizar, tomando valores de 1 a 12. Sp muestra la subparcela y ϵ es el error experimental del ensayo.

Métodos

Estimaciones de propiedades físicas

Las muestras fueron tomadas de manera superficial en cada una de las unidades experimentales en los primeros 5 cm del horizonte Ap. Se utilizaron cilindros de 5 cm de altura y 5,9 cm de diámetro, a los cuales se les determinó su masa húmeda; posteriormente se secó en estufa a 105° C durante 24 horas para obtener su masa seca, pudiendo así determinar el contenido gravimétrico de agua (P_w); con la densidad aparente (D_a), determinada con el método del cilindro (Sandoval *et al.*, 2012), se estimó el contenido volumétrico (P_v) de agua del suelo mediante la relación $P_v = P_w * D_a$. Para determinar la densidad real (D_r) se usó el método del picnómetro en muestras tamizadas a 2 mm (Sandoval *et al.*, 2012). Con estos datos se determinó la porosidad (S) del suelo mediante la relación $S = 1 - (D_a / D_r)$.

Con muestras tomadas mediante cilindros de las dimensiones detalladas previamente, se construyó la curva de retención de agua. Las muestras fueron equilibradas a -2 hPa y sometidas a tensiones de 60 y 330 hPa en cama de arena y olla de presión respectivamente. Se dispusieron muestras disturbadas para la aplicación de 15000 hPa de tensión, la cual se

dio en plato de presión (Sandoval *et al.*, 2012), transformando el valor gravimétrico a volumétrico mediante la relación previamente descrita.

A partir de la curva de retención de agua se determinó la distribución del tamaño de poros para cada tratamiento (Sandoval *et al.*, 2012); los poros de drenaje rápido (PDR, $> 50 \mu\text{m}$) se calcularon en base a la diferencia entre saturación (2 hPa) y el equilibrio a 60 hPa; para los poros de drenaje lento (PDL, $10\text{-}50 \mu\text{m}$) se calculó la diferencia entre el contenido de agua a 60 y 330 hPa; finalmente, los poros de agua útil (PAU, $0,2\text{-}10 \mu\text{m}$) se calcularon como la diferencia entre la retención de agua a 330 y 15000 hPa.

Mediante cilindros de 5 cm de altura y 4,7cm de diámetro se tomaron muestras no disturbadas, las cuales fueron sometidas a tensiones de 30, 60 y 330 hPa; una vez equilibradas, se midió la difusividad de oxígeno del suelo mediante una cámara de difusión con sensor de oxígeno. El coeficiente de difusión de gas (Dp) se midió a cada potencial mátrico (30, 60, 330 hPa) usando el método de Currie (1960) implementado por Rolston y Moldrup (2002) con nitrógeno como gas desplazante. La temperatura durante la medición puede fluctuar entre 12 y 30° C, por lo que la ecuación de Currie (1960) permite estandarizar los datos a 20°C (ecuación 1).

$$Dp_{T2} = Dp_{T1} * \left(\frac{T2}{T1}\right)^{1,72} \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde Dp_{T2} es el coeficiente de difusión a 20° C ($T2$) y Dp_{T1} es el coeficiente de difusión a la temperatura de medición ($T1$).

La difusividad del gas (Dp/Do) fue determinada como la relación entre el coeficiente de difusión del gas (Dp) corregido por la ecuación 1 y el coeficiente de difusión (Do) del oxígeno en el aire a 20°C.

La concentración de oxígeno dentro de la cámara de difusión se midió con un sensor de oxígeno (SO-110, Apogee Instruments, USA), y el consumo de oxígeno durante el tiempo de medición es considerado despreciable (Moldrup *et al.*, 2004).

Finalmente, se midió la continuidad de poros (Cd) mediante el índice propuesto por Ball (1981) como se puede observar en la ecuación 2.

$$Cd = \frac{(Dp/Do)}{fa} * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde la difusividad se expresa en relación a la porosidad llena de aire (fa). Se obtuvo fa a través de la proporción de poros con aire derivados de la curva característica a su respectivo equilibrio mátrico (60 y 330 hPa), expresada en relación a la porosidad total de cada muestra.

Contenido de materia orgánica

Para estimar el contenido de materia orgánica se usó el método de calcinación descrito por Sadzawka *et al.* (2006).

Medición de biomasa y rendimiento

Para la biomasa aérea y el rendimiento en grano, el 8 de Enero de 2020 se cosechó la parte aérea de la avena. Para esto se sacaron 3 hileras por metro lineal para el caso sin huella y 3 metros lineales por una hilera para el caso con huella. Las muestras fueron sometidas a secado en estufa de flujo forzado a 55° C durante el tiempo necesario para alcanzar masa constante. Posterior al secado, se separó la biomasa aérea del grano para posteriormente ser pesados. Los resultados obtenidos fueron extrapolados para las dimensiones de una hectárea de superficie.

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante modelos lineales mixtos. En caso de encontrar interacciones entre los tres factores (sistema de labranza, huella de la maquinaria y tiempo), el análisis se realizó comparando los niveles de un factor dentro de cada nivel del otro factor. Por el contrario, de no haber interacción se procedió a evaluar cada factor de manera independiente. De encontrarse diferencias estadísticamente significativas, se procedió a realizar una prueba de comparaciones múltiples de LSD Fisher, con un nivel de confianza del 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las evaluaciones de las propiedades físicas se hicieron en tres momentos. La primera fecha de evaluación fue el 4 de junio de 2019, fecha en la cual se realizó la siembra del cultivo. Esto ocurrió posterior a la preparación de suelo, que se realizó el día 3 de junio. La segunda fecha fue el 25 de noviembre de 2019, periodo en que el cultivo se encontraba en estado de espigadura. La tercera fecha fue el 8 de enero de 2020, que es donde se realizó la cosecha del cultivo.

El análisis de las propiedades se realizó para NH y H2 en los 3 momentos de medición y para los 4 sistemas de labranza, independiente de la H3, la cual se evaluó solo en los momentos de espigadura y cosecha, para los 4 sistemas de labranza.

Propiedades físicas

Contenido de agua

En los Apéndices 1 y 2 se pueden observar los detalles del análisis estadístico para NH, H2 y H3, mientras que en el Apéndice 3 se encuentran los resultados para cada sistema de labranza y posición de la huella en los 3 momentos de medición. Del Apéndice 1 se deriva la significancia estadística del factor tiempo (Figura 2, izquierda), indistintamente del sistema de labranza o posición respecto a la huella (NH, sin tránsito; H2, bajo la huella en el establecimiento). Para el caso de H3 (Apéndice 2), nuevamente la significancia se generó solo en el factor tiempo (Figura 1, derecha).

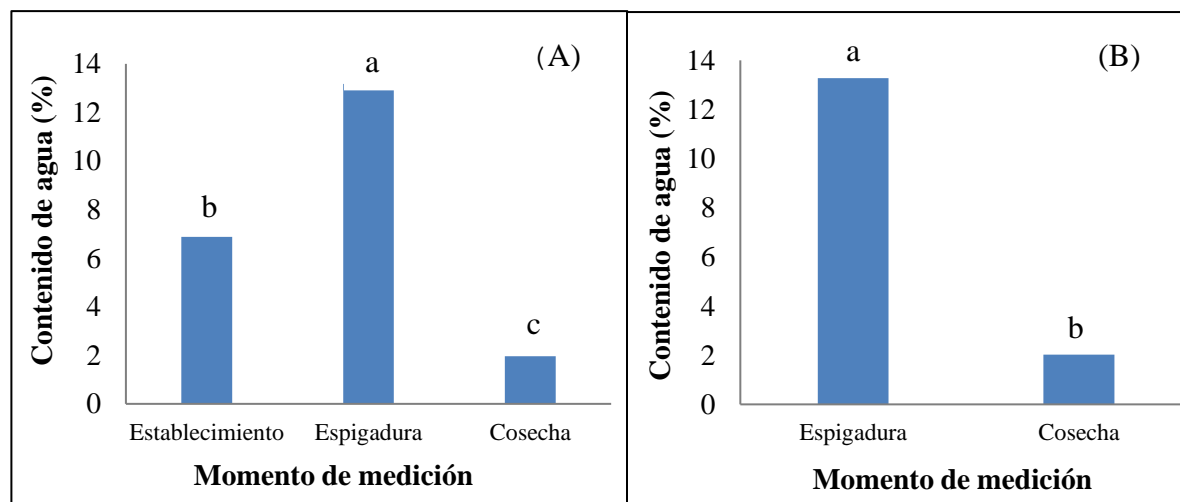


Figura 2. Promedio de contenido de agua (%) en los distintos momentos de medición durante la temporada para NH - H2 (A) y para H3 (B). Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Como se puede observar en la Figura 1, los mayores valores de contenido de agua en el suelo se observan al momento de la medición en espigadura, con valores cercanos a 13%, debido a que la medición se realizó posterior al último riego de la temporada; en el caso de NH y H2, se obtuvo un 13,18%, doblando prácticamente al valor obtenido al momento del establecimiento. Esto ocurre, por un lado, debido al crecimiento del cultivo, que aumenta su cobertura sobre el suelo, lo que en consecuencia disminuye el factor de evaporación desde la superficie (Allen *et al.*, 2006); por otra parte, Gelcich *et al.* (2020) indican que el principal monto de precipitaciones en el año 2019, cayó posterior al establecimiento del cultivo, entre los meses de Junio y Octubre (Apéndice 4). Esto se suma a que la mayor cantidad de riegos se dio en el mismo periodo de tiempo, por lo que no se logran discriminar efectos del sistema de labranza o la huella de tránsito.

En el caso de la cosecha, se obtuvieron valores muy bajos, debido a que el último riego de la temporada se aplicó el 19 de noviembre, transcurriendo más de un mes para la última medición, en el cual el suelo no tuvo entradas de agua y presentó una elevada evapotranspiración, debido a las altas temperaturas registradas en la zona durante estos meses (Santibañez *et al.*, 2017).

Los valores de agua aplicada son bajos con respecto a los necesarios para un cultivo de avena para grano, ya que según Faiguenbaum (2003) no debería sembrarse este cultivo en zonas donde las precipitaciones sean inferiores a 450 mm anuales, debido a que requiere una gran cantidad de agua para completar su ciclo de desarrollo. Sin embargo, los riegos aplicados y las precipitaciones naturales generaron las condiciones de humectación y secado que favorecen el proceso de estructuración post labranza (Seguel y Horn, 2006)

Densidad aparente

Los análisis indican que para NH y H2, se encuentran diferencias estadísticamente significativas para el factor labranza, mientras que para H3 no se encuentran diferencias estadísticamente significativas para ningún factor. Para mayor detalle revisar los apéndices 5, 6 y 7.

Como se puede observar en la Figura 3, las principales diferencias se dan entre los sistemas de labranza más intensivos versus los menos intensivos; así, los sistemas Rotativo y Disco presentan valores de 1,27 y 1,28 Mg m⁻³ respectivamente, siendo los valores mas altos observados en el estudio. En el caso de los sistemas más conservacionistas, como Cero y Cincel, se alcanzan valores de 1,15 y 1,19 Mg m⁻³ respectivamente. Esto se contradice con el estudio realizado por Alvarez y Steinbach (2009), en el cual se analizó la influencia de sistemas de labranza en las propiedades físicas del suelo, concluyendo que los mayores valores de densidad aparente se generan en sistemas de cero y mínima labranza, lo que es provocado debido a que el suelo no es alterado mediante equipos de labranza y se utilizan maquinarias de gran masa para la realización de sus labores. Esta mayor densificación de partículas en superficie también ha sido reportado por otros autores (Acevedo y Silva, 2003, Kayser *et al.*, 2013) en sistemas de cero labranza. Este efecto puede verse intensificado en

los primeros años de aplicación de labranza cero, debido a los pasos de tractor y la falta de soltura del suelo por ausencia de labranza (Lampurlanés y Cantero-Martínez, 2003).

Los resultados obtenidos en los sistemas de labranza intensivos concuerdan con el estudio realizado por Blanco Canqui *et al.* (2009), en el cual se evaluó la densidad aparente y se establecieron relaciones con otra propiedades del suelo. Los valores mayores de densidad aparente se observan con el uso de equipos intensivos como arados Rotativos y de Discos, ya que éstos generan un rápido asentamiento del suelo posterior a las labores de labranza (Osunbitan *et al.*, 2005). Esto ocurre debido a los ciclos de humectación y secado a lo largo de la temporada y por la ruptura y dispersión de los agregados del suelo producto del efecto de la caída de lluvia, lo que genera la pérdida de macroporosidad (Ahuja *et al.*, 1998; Alletto y Coquet, 2009). En el presente estudio, el resultado se explicaría de manera similar, en que la menor disturbación superficial mantiene el rastrojo como protección frente al riego y la lluvia, asegurando la persistencia de la estructura y previniendo su dispersión y asentamiento (Blanco Canqui *et al.*, 2015).

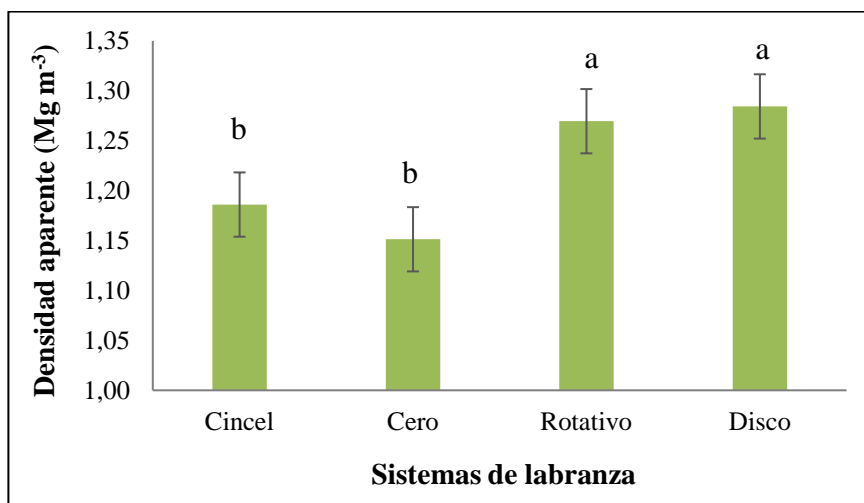


Figura 3. Promedio de densidad aparente (Mg m⁻³) en NH y H2 para los distintos sistemas de labranza durante la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Porosidad total

Los valores densidad real obtenidos en la zona donde se realizó el estudio fluctúan entre 2,46 y 2,62 Mg m⁻³. En la Figura 4, se pueden observar diferencias estadísticamente significativas para la porosidad total entre los sistemas de labranza para NH y H2, resaltando la diferencia entre sistemas de labranza conservacionista y convencional. En el caso de H3 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para ningún factor. Para más detalles consultar Apéndices 9, 10 y 11.

Los valores más altos se obtienen en los sistemas conservacionistas, con 54,4% para la

labranza cero y 52,9% para cincel, mientras que los valores más bajos son obtenidos por sistemas convencionales como el disco y rotativo, este último presentando el valor más bajo, con un 49,0%. Estos resultados no concuerdan con el estudio realizado por Sasal *et al.* (2006) en pampas de Argentina con precipitaciones estivales, en el cual se obtienen valores más bajos en la cero labranza, presentando diferencias entre un 9 – 10% de menor porosidad total con respecto a la labranza convencional.

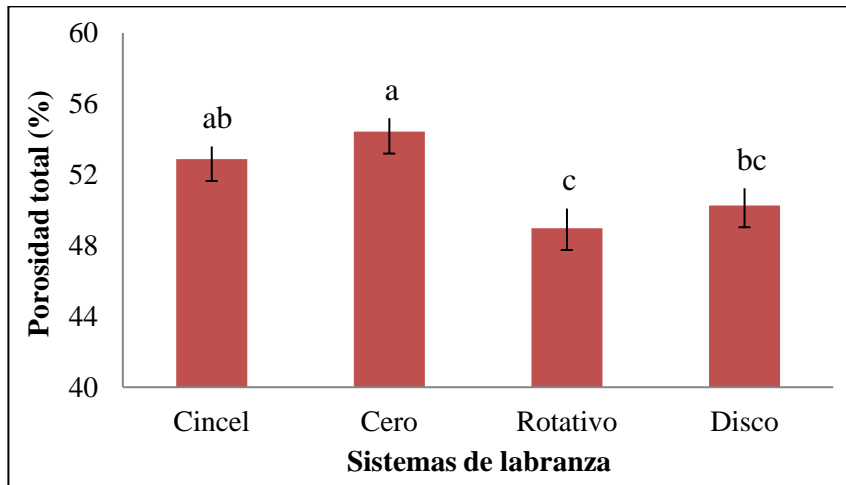


Figura 4. Promedio de porosidad total (%) en NH y H2 para los distintos sistemas de labranza durante la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

La porosidad total es una propiedad que está inversamente relacionada con la densidad aparente, por lo que al obtener bajos valores en esta última determinará que existan mayores valores de porosidad total (Hillel, 2004). Los mayores valores obtenidos en los sistemas conservacionistas pueden explicarse debido a que sistemas como la cero labranza presentan una mayor estabilidad mecánica del suelo, provocando que no se produzca una variación de la porosidad dentro de la temporada (Martínez *et al.*, 2008). Por otra parte, estos sistemas generan un aumento de la cantidad de carbono orgánico cerca de la superficie del suelo, aumentando la porosidad total (Abid y Lal, 2008).

En el caso de los sistemas convencionales, se obtienen valores más bajos como promedio de la temporada, debido a que la porosidad generada por la acción de labranza es temporal e inestable posterior a estas labores (Dörner *et al.*, 2012), siendo mermada por la acción de la lluvia o de la gravedad (Mapa *et al.*, 1986; Osunbitan *et al.*, 2005). Un estudio realizado por Pagliai *et al.* (2004) indica que la porosidad se ve disminuida en suelos con araduras intensivas debido a la presencia de pies de arado en el perfil, que generan un efecto de confinamiento de las partículas sueltas en superficie, los que se ven más propensos a reasentarse por efecto de las cargas hidráulicas y mecánicas, estas últimas altamente dependientes de la masa del equipo y el tiempo de tráfico de la maquinaria (Kay y VandenBygaart, 2002).

Poros de drenaje rápido (PDR) y Poros de drenaje lento (PDL)

La porosidad gruesa se categoriza en la función de drenaje rápido del agua del suelo ($PDR > 50 \mu m$) y en una capacidad de drenaje un poco más lenta (PDL, $10 - 50 \mu m$), siendo fundamentadas en la capacidad de aire del suelo para la oxigenación del sistema de raíces (Hartge y Horn, 2009). El resultado estadístico (Apéndices 12, 13 y 14) indica que para los PDR se generó un efecto significativo para los factores sistemas de labranza y tiempo por separado en NH y H2 (Figura 5), sin significancia para H3, en tanto en los PDL (Apéndices 15, 16 y 17) se generó un efecto significativo para el factor tiempo en NH y H2, mientras que para H3 se tiene un efecto significativo para los factores labranza y tiempo por separado.

Como se puede apreciar en la Figura 5, la cantidad más alta de PDR se produce en el sistema de Cero labranza, con un 19,5%, presentando diferencias estadísticamente significativas con los sistemas de Cincel y Rotativo, siendo este último el valor más bajo, con un 15,1%. Los sistemas de Disco y Cincel no presentan diferencias estadísticamente significativas y presentan valores de 17,7% y 17,3% respectivamente, esto para NH y H2. En H3 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas. Los valores de PDR en cero labranza pueden explicarse debido a que la fauna del suelo, canales y espacios de poros provocados por el crecimiento radical no han sido alterados por los procesos de labranza (Osunbitan *et al.*, 2005). Junto con esto, debido al aporte de materia orgánica al suelo provocado por este tipo de sistema, la porosidad gruesa se mantiene estable a lo largo de la temporada (Alvarez y Steinbach, 2009).

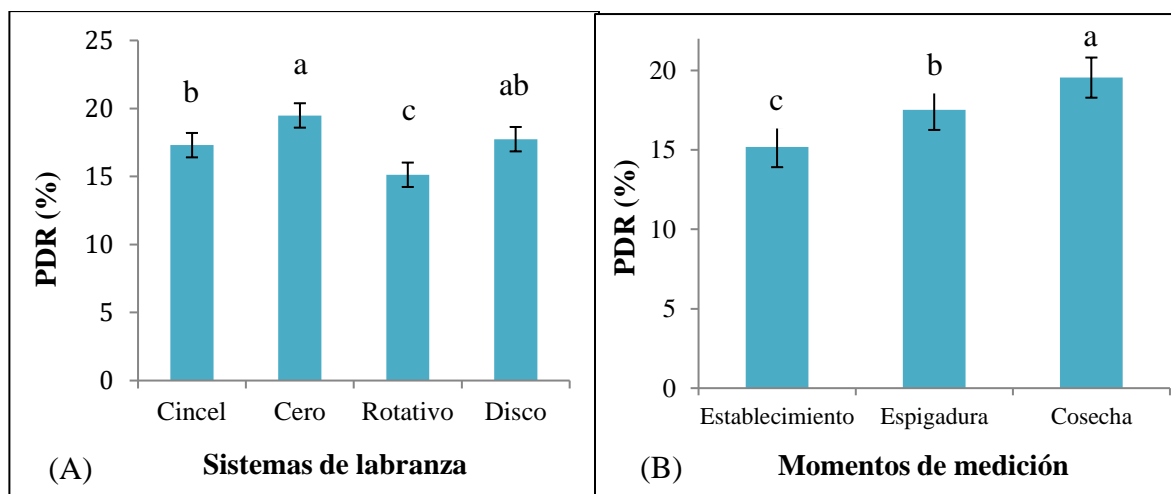


Figura 5. Promedio de poros de drenaje rápido (%) en NH y H2 para (A) los distintos sistemas de labranza durante la temporada y para (B) los distintos momentos de medición. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

En un estudio realizado por Bhattacharyya *et al.* (2006), se obtuvo que los sistemas convencionales generaban mayor cantidad de PDR que los sistemas conservacionistas, pero esto ocurre en suelos arcillosos, donde los ciclos de humectación y secado generan grietas que actúan como macroporos. En el presente estudio, con una clase textural franca gruesa, el

constante paso de estos equipos para preparar suelo en los sistemas intensivos genera una redistribución de la materia orgánica, con pérdida de esta en el largo plazo (Six *et al.*, 2004; Hajnos *et al.*, 2006), lo que en consecuencia produce una baja estabilidad de agregados, produciendo un encostramiento superficial y/o un pie de arado a la profundidad trabajada (Pagliai *et al.*, 2004).

Como se puede observar en las Figuras 5B, 6A y 6B, la cantidad de PDR y PDL va aumentando a medida que avanza la temporada, indistintamente del sistema de labranza o la huella. En el caso de los PDR, aumenta de 15,2% en el establecimiento del cultivo a 19,6% en la cosecha, mientras que para los PDL el aumento se produce de 6,0% en el primer momento a 12,1% en la cosecha para NH y H2, mientras que para H3 el aumento se produce desde 9,0% a 11,7%.

Estos aumentos en primavera - verano pueden explicarse debido a la generación de procesos de agregación inducidos principalmente por ciclos de humectación y secado a lo largo de la temporada, lo que produce la continua formación de poros gruesos producto de fracturas y microfracturas (Pires *et al.*, 2005; Dörner y Horn, 2006; Seguel y Horn, 2006). La lluvia y el riego son los principales factores reguladores de los procesos de humectación, secado y reconsolidación de suelos labrados (Peña-Sancho *et al.*, 2016). La reconsolidación ocurre debido a que posterior a un largo proceso de ausencia de precipitaciones, los agregados del suelo se contraen, favoreciendo la formación de PDL en el suelo, mientras que cuando los procesos de humectación y secado son intensos dentro de la temporada se favorece la formación de PDR (Bodner *et al.*, 2013). Junto con estos procesos, con el paso del tiempo y por medio de la actividad de las raíces y microfauna van generando progresivamente macroporos, que se mantienen estables a lo largo de la temporada (Kay y VandenBygaart, 2002; Castellini y Ventrella, 2012).

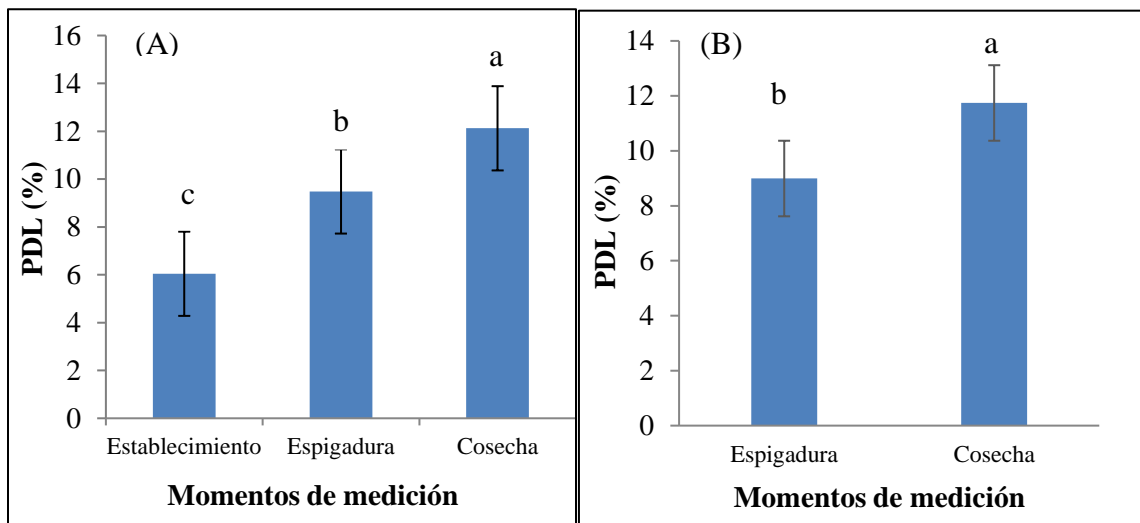


Figura 6. Promedio de poros de drenaje lento (%) para NH y H2 (A) y para H3 (B) en los distintos momentos de medición en la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

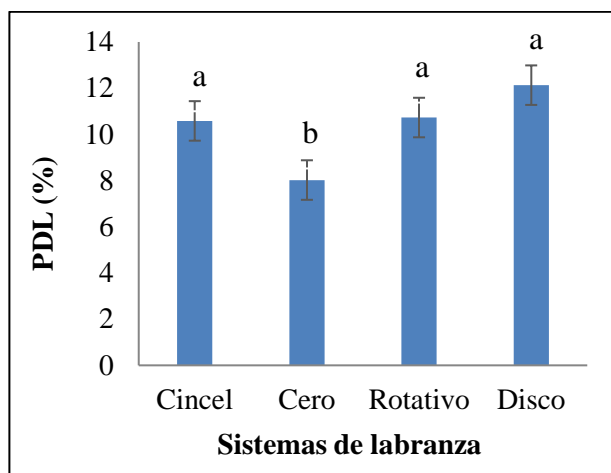


Figura 7. Promedio de poros de drenaje lento (%) en H3 para los distintos sistemas de labranza. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

En el caso de H3, como se puede observar en la Figura 7, también se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas Cincel, Rotativo y Disco, significativamente mayores a la labranza Cero, obteniendo valores de 10,6 %, 10,8 % y 12,1% respectivamente, contra un 8,0% de PDL en la labranza cero. Para mayor detalle estadístico revisar Apéndice 16. Esta tendencia concuerda con lo observado por Osunbitan *et al.* (2005), donde se encontró una mayor cantidad de mesoporosidad en sistemas convencionales con respecto a los conservacionistas, debido a que la macroporosidad colapsa por efecto de la lluvia en los sistemas convencionales, generando una mayor cantidad de mesoporos. Otro factor que puede estar incidiendo en una mayor cantidad de PDL en sistemas convencionales, es una posible compactación superficial, provocada por el tránsito de maquinaria (Hakansson, 2005), como es el caso de H3 con un tránsito con pulverizadora.

Poros de agua útil (PAU)

Para NH y H2 se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el factor tiempo, mientras que para H3 no se encontraron diferencias en ninguno de los factores. Para más detalle revisar los Apéndices 18, 19 y 20.

En la Figura 8 se puede ver que los valores de agua aprovechable (PAU) van disminuyendo a medida que transcurre la temporada, comenzando con un 17,1% al momento del establecimiento del cultivo y terminado con 10,6% en la cosecha, indistintamente del sistema de labranza o el tipo de huella. Esto ocurre debido a que al aumentar los procesos de estructuración y agregación durante la temporada, producto de los ciclos de humectación – secado y por efecto de la actividad biológica, la cantidad de PAU disminuye debido a que se van formando poros de mayor tamaño dentro de los agregados y entre los agregados (Nimmo, 2004).

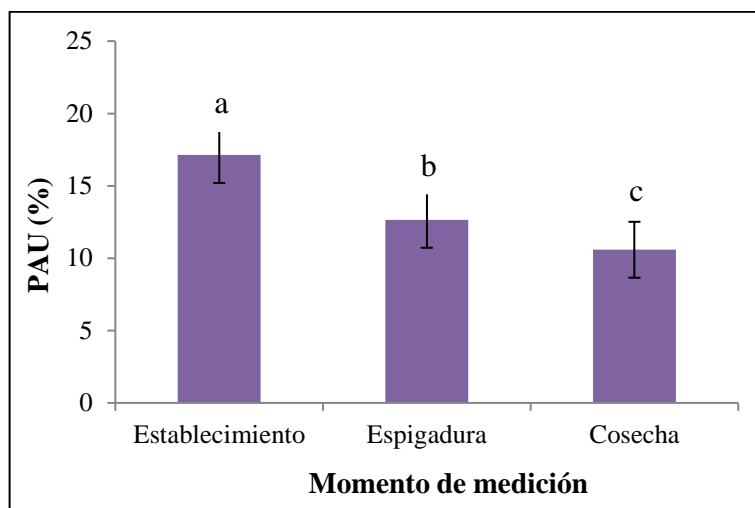


Figura 8. Promedio de poros de drenaje útil (%) PAU en NH y H2 para los distintos momentos de medición en la temporada. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Martínez *et al.* (2008) realizaron un estudio en un sitio cercano, comparando sistemas de labranza tradicional y cero en el largo plazo. Para muestras tomadas al momento de la cosecha, obtuvieron valores que fluctúan entre 18,5 y 20,6 % de agua aprovechable, prácticamente doblando los resultados obtenidos en este estudio en el mismo momento. Esto se puede relacionar a que en manejos de labranza de largo plazo, los macroporos ($>10 \mu\text{m}$) son inestables durante la temporada (Six *et al.*, 2004), favoreciendo la formación de poros de menor tamaño, mientras que en este estudio, con tan solo dos años de manejo, ocurre el proceso contrario, existiendo una continua formación de poros gruesos a lo largo de la temporada, lo que produce una menor formación de PAU ($0,2-10 \mu\text{m}$).

Con respecto al factor huella, no fue significativo en ninguna propiedad de las mencionadas anteriormente, lo que puede deberse a que los procesos de humectación y secado, dados por las condiciones ambientales, fueron tan fuertes que logran reducir las diferencias entre zonas de tránsito y no tránsito.

Difusividad de oxígeno

Para NH y H2, se encontraron diferencias estadísticamente significativas para la interacción tiempo x tensión, mientras que para H3 no se encontraron diferencias estadísticas para la interacción entre factores, pero sí para el tiempo y la tensión de manera independiente. Para mayor detalle revisar los apéndices 21, 22 y 23.

En el Cuadro 3, se presentan los valores promedios de difusividad de oxígeno ($Dp/D0$) para las tensiones 60 y 330 hPa en los 3 momentos de medición. En el caso de NH y H2, los menores valores de difusividad se presentan a los 60 hPa de tensión para los momentos de establecimiento y espigadura con valores de 0,1 y 0,078 respectivamente, mientras que los

mayores valores se presentan para a los 330 hPa de tensión a los momentos de cosecha y espigadura con 0,213 y 0,189 respectivamente. En ambas tensiones la difusividad va aumentando con el paso del tiempo, encontrándose los valores más altos al momento de la cosecha. Este incremento en la difusividad con el paso del tiempo puede estar relacionado con el aumento de la porosidad gruesa que se produce a lo largo de la temporada en el estudio.

Cuadro 3. Promedio de $Dp/D0$ para NH – H2 a las tensiones 330 y 60 hPa en los 3 momentos de medición.

Tiempo	$Dp/D0$	
	60 hPa	330 hPa
Establecimiento	0,078 (\pm 0,01) f	0,118 (\pm 0,02) d
Espigadura	0,100 (\pm 0,02) e	0,189 (\pm 0,03) b
Cosecha	0,135 (\pm 0,03) c	0,213 (\pm 0,02) a

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$) para la interacción tiempo x tensión.

Para H3 y como se indica en los Cuadros 4 y 5, los mayores valores también se dan al momento de la cosecha, con $Dp/D0 = 0,175$ y en la tensión 330, con $Dp/D0 = 0,205$; esta diferencia entre tensiones es generada debido a que el contenido de agua en el suelo es limitante para el flujo de oxígeno a través de este.

Cuadro 4. Promedio de $Dp/D0$ para H3 en los momentos de Espigadura y Cosecha.

Tiempo	$Dp/D0$
Espigadura	0,154 (\pm 0,05) b
Cosecha	0,175 (\pm 0,05) a

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Cuadro 5. Promedio de $Dp/D0$ para H3 en las tensiones 330 y 60 hPa.

Tensión	$Dp/D0$
60	0,124 (\pm 0,02) b
330	0,205 (\pm 0,03) a

Letras distintas indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Con respecto a la porosidad llena de aire, los valores fluctuaron entre 10 y 25%, dependiendo de la tensión a la que se midió la muestra. Kühne *et al.* (2012) señalan que suelos con poros llenos de aire entre 10 y 20%, presentan valores de $Dp/D0$ entre 0,013 y 0,035, pero si no están disturbados los valores pueden superar los 0,05. En dicho estudio, los niveles de limo son cercanos a 70%, lo que explica los menores valores de $Dp/D0$ en relación al presente estudio. Aun así, los resultados de la presente investigación no logran discriminar el efecto de perturbación de la labranza o de la huella de tránsito.

Índice de continuidad

En el análisis estadístico para el índice de continuidad en NH - H2, se encontró triple interacción entre los factores labranza x posición x tiempo. Por su parte, en H3 se obtuvo una interacción triple entre labranza x tiempo x tensión. Para más detalle revisar apéndices 24, 26 y 27.

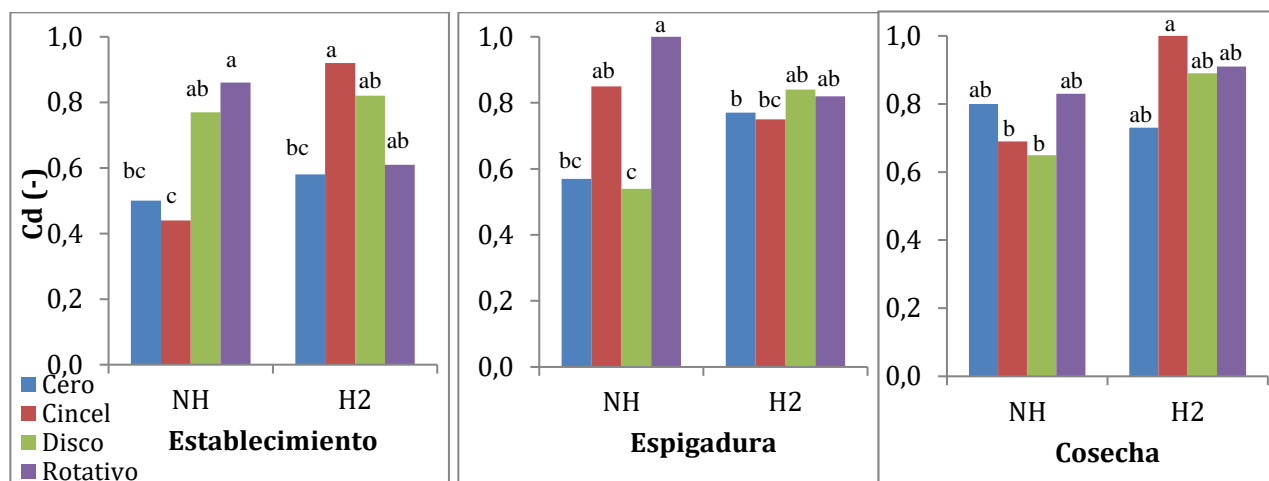


Figura 9. Índice de continuidad (Cd) para NH y H2 en todos los sistemas de labranza y en establecimiento, espigadura y cosecha. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas para la triple interacción labranza x posición x tiempo ($\alpha < 0,05$).

Se observa un incremento del índice de continuidad a lo largo de la temporada, destacando el sistema de labranza Rotativo NH y Cincel H2 en los momentos de espigadura y cosecha, respectivamente, con los valores máximos. El valor más bajo los presenta Cero labranza NH y Cincel NH, con 0,50 y 0,44 respectivamente al momento del establecimiento. Esta tendencia se mantiene para todos los momentos del estudio.

En el establecimiento, los valores más altos de índice de continuidad los presentan los sistemas de Disco (NH y H2) Rotativo NH y Cincel en H2, aunque este último sistema de labranza presentó los valores extremos (máximo en H2 y mínimo en NH). Los valores más bajos fueron obtenidos por los sistemas de labranza Cero y Cincel NH. Esto concuerda con el estudio realizado por Schjonning y Rasmussen (2000) donde se presentaron valores de índice de continuidad de poros más altos en sistemas convencionales con respecto a los conservacionistas, lo que es provocado debido a que en estos últimos hay una mayor tortuosidad de la red de poros, lo que genera una disminución de la difusividad de gases provocado por los aportes frescos de materia orgánica con respecto a los otros sistemas (Hamamoto *et al.*, 2012). También Ball (1981) reporta que estos sistemas disminuyen la porosidad llena de aire producto de que aumentan los poros llenos de agua, provocando una disminución de la conectividad y por ende de la difusividad relativa de aire, lo que en consecuencia genera una disminución en los valores del índice de continuidad con respecto a los sistemas convencionales (Piccoli *et al.*, 2017).

Para el factor huella, el promedio de los valores de índice de continuidad es mayor en H2 que en NH, lo que puede responder a fenómenos de agrietamiento por tráfico, que genera continuidad para los fenómenos de flujo (Bhattacharyya *et al.*, 2006). Esto se favorece porque el muestreo de suelo se realizó inmediatamente después del establecimiento, pero dicha porosidad generada por corte como consecuencia del tráfico no debiese tener suficiente estabilidad una vez que el suelo se vuelva a humedecer (Horn y Hartge, 2017).

Para la espigadura se produce un aumento en casi todos los casos, exceptuando Cincel H2 y Disco NH que presentan una disminución. El aumento en espigadura puede ser provocado por los procesos de humectación y secado, que generan procesos de agregación en el suelo, formando macroporos entre los agregados del suelo a lo largo de la temporada (Horn y Smucker, 2005), los cuales se caracterizan por ser menos tortuosos, provocando un aumento de la continuidad de poros (Uteau *et al.*, 2013), además de contribuir fuertemente a un aumento en la difusividad de los gases en el suelo (Kreba *et al.*, 2017). Este aporte de la macroporosidad puede ser aún mayor debido a que la materia orgánica humificada provoca un aumento en la estabilidad de agregados a lo largo de la temporada (Six *et al.*, 2004), logrando mantener y aumentar el número de PDR, como se describió anteriormente.

En la cosecha se produjo un aumento del índice de continuidad en la mayoría de los tratamientos, exceptuando Cincel NH, Rotativo NH y Cero labranza H2, que disminuyen sus valores en 0,16, 0,17 y 0,04 respectivamente. Los valores en este momento fluctúan entre 0,65 y 1, aunque las diferencias se generaron sólo entre Cincel H2 y Cincel y Disco NH. Esta diferencia entre Cincel NH y H2 también es generada al momento de establecimiento y puede deberse a que en zonas de tránsito la estabilidad estructural es mayor (Alleto y Coquet, 2009), por lo que la macroporosidad no disminuye en gran medida, manteniendo un constante flujo de oxígeno a través del suelo. Para el análisis estadístico en el caso de H3, se encontró interacción triple entre los factores: labranza x tiempo x tensión, como se detalla en la Figura 10. Para mayor detalle revisar apéndices 25 y 28.

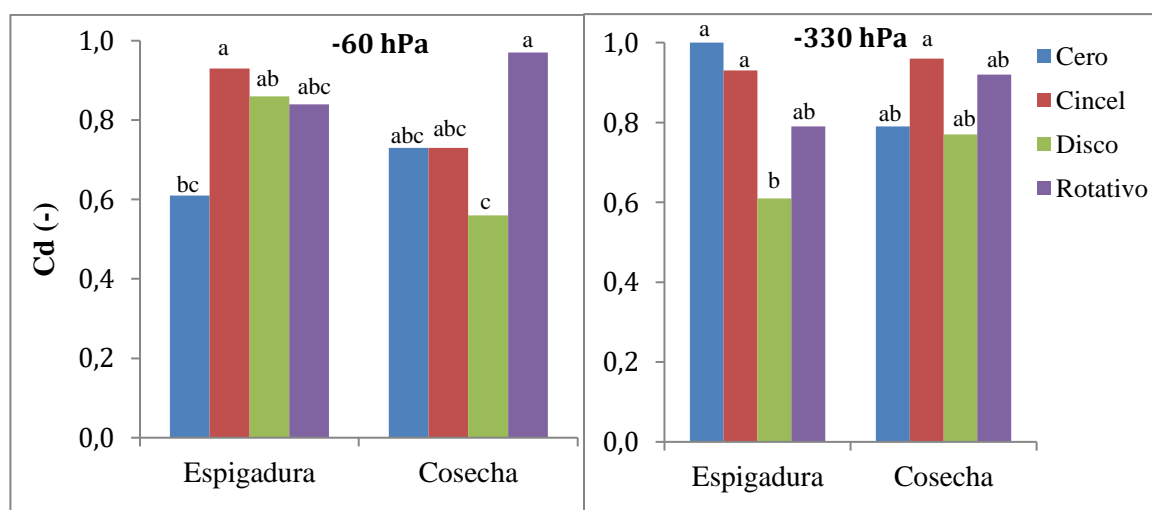


Figura 10. Índice de continuidad en H3 para el momento de espigadura y cosecha, para los cuatro sistemas de labranza a las tensiones de 60 hPa y 330 hPa.

Los valores para H3 fluctúan entre 0,56 y 1 para los sistemas labranza de Disco a 60 hPa de tensión al momento de la cosecha y Cero a 330 hPa de tensión para el momento de espigadura respectivamente. Por otra parte, aunque de manera no tan evidente, se presenta un aumento promedio del índice de continuidad a medida que pasa el tiempo dentro de la temporada.

Según Thorbjorn *et al.* (2008) uno de los principales factores que limitan la difusión de gases en el suelo es el contenido de agua, ya que se cortan los canales de flujo de los gases, los que en general poseen valores de difusión en fase líquida varios órdenes de magnitud menor que en fase gaseosa (Romero *et al.*, 2016). La Figura 10 denota la eficiencia en el proceso de difusión, ya que hay sistemas de labranza como el Rotativo en cosecha y el cincel en espigadura que al ser equilibrados con una tensión baja (60 hPa), es decir con una menor porosidad llena de aire que a -330 hPa, presentan valores del índice superiores a 0,9, no incrementándose más cuando se equilibran a -330 hPa. Si bien la labranza con Disco disminuye al pasar de -60 a -330 hPa, las diferencias no son estadísticamente significativas.

En el caso de la tensión 330 hPa, los sistemas Rotativo, Disco y Cincel aumentan sus valores entre espigadura y cosecha, en tanto el sistema de Cero labranza disminuye de 1 a 0,79. Según Arah y Ball (1994), en estos sistemas existe una menor cantidad de poros funcionales y una mayor cantidad de poros bloqueados.

También cabe destacar que para un mejor entendimiento Ball (1989) señala que, al evaluar sistemas de labranza, los índices de porosidad son mucho más favorables en manejos de largo plazo que entre un mediano y corto plazo.

Los valores menores a 0,1 y a 0,6 para la difusividad de oxígeno y continuidad de poros respectivamente, no son restrictivos para el transporte de aire dentro del suelo, dado que responden los distintos manejos, usos y condiciones que el suelo presenta. En un estudio realizado por Kreba *et al.* (2017) se obtuvo un correcto desarrollo tanto de un sistema de praderas como de cultivo a pesar de que los valores obtenidos para estas propiedades fueron considerablemente más bajos que los presentados en este estudio.

Contenido de materia orgánica

En el análisis estadístico de materia orgánica (MO) se presentó interacción triple para los 3 factores, labranza x posición x tiempo, lo que se ve reflejado en el Cuadro 6. Para H3 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas para ningún factor ni interacción, promediando un contenido de 3,59%. Para ver mayor detalle del análisis estadístico revisar los apéndices 29, 30 y 31.

El valor más alto de MO lo presenta el sistema de Cero labranza en H2 al momento de espigadura, con un 4,95%, seguido por el Cincel en H2 al mismo momento, con un 3,79%, mientras que entre los menores valores destacan los sistemas de labranza a la cosecha, con excepción de labranza de Disco H2 y Cero en ambas huellas.

Cuadro 6. Promedio de materia orgánica (%) para los sistemas de labranza en NH y H2 en los 3 momentos de medición en la temporada.

	Cincel	Cero	Rotativo	Disco
	(%)			
	Establecimiento			
NH	3,25 ($\pm 0,36$) bc	3,37 ($\pm 0,39$) bc	3,15 ($\pm 0,99$) bc	2,76 ($\pm 0,28$) c
H2	2,72 ($\pm 0,38$) c	3,48 ($\pm 0,27$) bc	3,03 ($\pm 0,07$) bc	3,13 ($\pm 0,36$) bc
	Espigadura			
NH	2,90 ($\pm 0,28$) c	3,02 ($\pm 0,47$) bc	2,59 ($\pm 0,32$) c	3,05 ($\pm 0,45$) bc
H2	3,79 ($\pm 0,75$) b	4,95 ($\pm 1,86$) a	3,29 ($\pm 0,82$) bc	2,80 ($\pm 0,41$) c
	Cosecha			
NH	2,75 ($\pm 0,17$) c	3,17 ($\pm 0,10$) bc	2,69 ($\pm 0,41$) c	2,64 ($\pm 0,52$) c
H2	2,69 ($\pm 0,48$) c	3,02 ($\pm 0,35$) bc	2,74 ($\pm 0,28$) c	3,34 ($\pm 0,10$) bc

Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$) para la interacción de labranza x huella x tiempo de medición.

En el establecimiento, los mayores valores los presentó la Cero labranza en NH y H2 con 3,37 y 3,48% respectivamente, seguido por el Cincel NH, con 3,25%. Es sabido que la Cero labranza promueve la acumulación de MO, principalmente en los primeros centímetros del perfil (Martínez *et al.*, 2008; Franzluebbers, 2010), encontrándose hasta un 50% más de nuevo carbono en los primeros 4 cm de suelo en este sistema (Balesdent *et al.*, 2000).

Los valores más bajos en el establecimiento fueron observados en los sistemas de Disco en NH con 2,76% y Cincel H2, con 2,72%. Los bajos valores pueden explicarse debido a que, al invertir el suelo mediante arado y rastras, los restos vegetales quedan concentrados y estratificados subsuperficialmente, disminuyendo su concentración en superficie (Kay y VandenBygaart, 2002). Otro aspecto a considerar es el efecto de oxigenación que generan los sistemas de labranza primaria, incluido el cincel, lo cual acelera la oxidación de carbono orgánico, liberando grandes cantidades de éste en forma de CO₂ hacia la atmósfera (La Scala *et al.*, 2008; Hernanz *et al.*, 2002). El sistema rotativo no genera este efecto, debido a que el sobrelaboreo disminuye la porosidad gruesa de aireación (Figura 5). Finalmente, la acción mecánica provoca rompimiento de los agregados del suelo, dejando la fracción lábil de materia orgánica, originalmente protegida por los agregados, disponible para ser descompuesta rápidamente (Six *et al.*, 1999).

En espigadura aumentan los valores de Cero labranza H2, alcanzando el valor más alto, con un 4,95%; lo mismo ocurre con Cincel H2, que alcanza un 3,79%. El alza de estos valores con respecto al momento del establecimiento puede ocurrir debido a que los sistemas conservacionistas aumentan el contenido de agua del suelo (Martínez *et al.*, 2008), lo que genera un incremento en la actividad y biomasa biológica (Balesdent *et al.*, 2000). Esto favorece la descomposición de los residuos vegetales dejados en superficie, aumentando la fracción lábil de materia orgánica (Chen *et al.*, 2009), lo que también ocurrió, aunque con

menor intensidad, en Rotativo H2 y Disco NH, alcanzando valores de de 3,29% y 3,05%.

En este mismo momento se da un proceso de disminución de materia orgánica en algunos sistemas de labranza, principalmente en Disco H2, Cíncel NH y Rotativo NH, disminuyendo en 0,33%, 0,35% y 0,56%, aunque sin diferencias estadísticas significativas. Esta disminución es principalmente generada por el flujo de CO₂ hacía la atmosfera, debido a que aproximadamente 3 meses posterior a la realización de la labranza las pérdidas de carbono en forma de CO₂ se maximizan en suelos labrados (Reicosky, 2002).

Al momento de la cosecha se obtuvieron los valores más bajos de la temporada, con excepción de Disco H2, que supera el valor medido al momento del establecimiento, y ambas posiciones en labranza Cero. El descenso generalizado del contenido de MO puede estar asociado a los procesos de humectación y secado ocurridos durante la temporada, los cuales disminuyen la estabilización de la materia orgánica en el suelo, producto de la dinámica de agregación, aumentando la pérdida de MO por respiración biológica (Denef *et al.*, 2001).

Reynolds *et al.* (2008) establece que valores de MO superiores a 3% son optimos para un suelo de clase textural franca, ya que permite mantener la calidad física del suelo y ayuda al establecimiento de las plantas. En este sentido, en la mayoría de los casos se cumple esta condición, pensando que posterior a la cosecha se reinicia un ciclo de descomposición y humificación de los residuos, beneficiando al suelo en la siguiente temporada.

Mediciones en la planta

Biomasa

Para la biomasa del cultivo no se encontró interacción entre los factores, pero sí se encontraron diferencias estadísticamente significativas para los factores labranza y posición de la huella de manera independiente. En la Figura 11 se puede observar que se dan diferencias estadísticamente significativas entre Cero labranza y los sistemas Rotativos y Disco. Para mayor detalle revisar apéndice 32 y 34.

En el sistema de labranza con cíncel se cosechó 2,57 ton ha⁻¹ de biomasa aérea, mientras que el menor valor obtenido es de 1,41 ton ha⁻¹ en Cero labranza. Para los sistemas intensivos se obtuvieron los mayores valores, con 3,63 y 2,99 ton ha⁻¹ para rotativo y disco, respectivamente. Este resultado concuerda con lo señalado por Gil *et al.* (2014), quienes en labranza convencional observaron mayores rendimientos de una avena forrajera (6,37 Ton ha⁻¹), en relación a sistemas de Cero labranza, con rendimientos de 4,59 Ton ha⁻¹.

El bajo valor observado en el sistema de cero labranza, pueden explicarse debido a que al no haber una preparación de suelo previa a la siembra, se produjo una infestación de malezas que generaron competencia con el cultivo, lo que provocó una menor interceptación de radiación, absorción de agua y nutrientes y en consecuencia una menor acumulación de

biomasa (Acevedo y Silva, 2003). El sistema de Cincel no presenta diferencias estadísticas con los sistemas Rotativo y Disco, lo que puede atribuirse a la capacidad de macollaje que tienen los cereales de invierno, permitiendo que las diferencias entre biomasa cosechada no se acentúen entre estos sistemas (Acevedo y Silva, 2003).

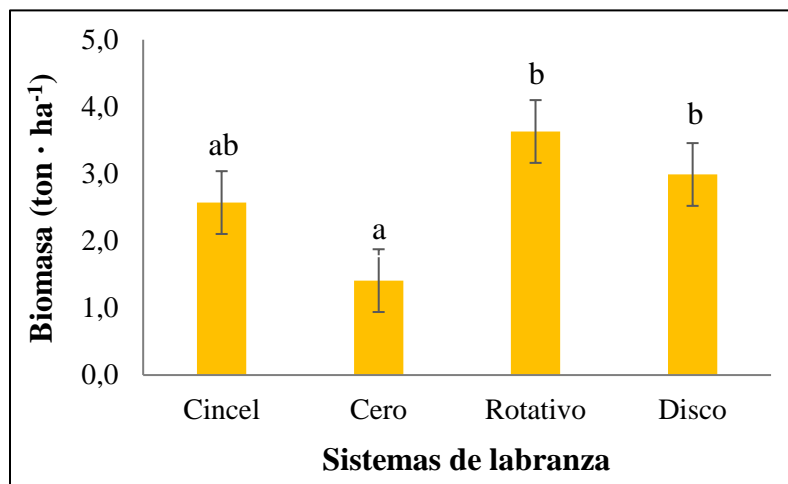


Figura 11. Promedio de biomasa (ton ha⁻¹) cosecha para los distintos sistemas de labranza. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Finalmente, el efecto del tránsito de la maquinaria se reflejó en la cantidad de biomasa cosechada, obteniendo mayor cantidad de biomasa en NH (ausencia de huella) con 3,15 ton ha⁻¹, mientras que en H2 (tránsito en el establecimiento) se obtuvo 2,15 ton ha⁻¹, con diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$). Este efecto es producido debido a que con el tráfico de maquinaria se produce un deterioro en la estructura de los suelos, generando compactación en ellos (Hamza y Anderson, 2005); esto provoca una reducción en el crecimiento y densidad radical, no permitiendo el correcto desarrollo del cultivo (Botta *et al.*, 2010). El daño provocado por el tráfico de maquinaria reduce la cantidad de biomasa producida y la calidad del producto cosechado; este impacto es mucho mayor, si el pisoteo ocurre en la hilera del cultivo y en condiciones de alto contenido de agua en el suelo (Hakansson, 2005).

Rendimiento

No se encontraron diferencias estadísticamente significativas para el rendimiento en los factores de manera independiente (sistema de labranza y posición de la huella), ni tampoco para la interacción entre ambos. Para mayor detalle revisar apéndice 33 y 34. En la Figura 12, se observan los valores de rendimiento para cada sistema de labranza en las posiciones NH y H2.

Los bajos valores de rendimiento obtenidos en este estudio, están directamente relacionados con la cantidad de precipitaciones caídas durante la temporada, en la cual según Gelcich *et al.* (2020) se tuvo un 83% de déficit en precipitaciones con respecto a un año normal,

registrándose 77,6 mm durante el año 2019 en la Región Metropolitana. Esto se relaciona a lo registrado por Brunel Saldías *et al.* (2018), donde en años secos con 356 mm en Cauquenes, Región del Maule, los rendimientos en rotaciones de avena fueron 3 veces inferiores a los rendimientos en un año normal.

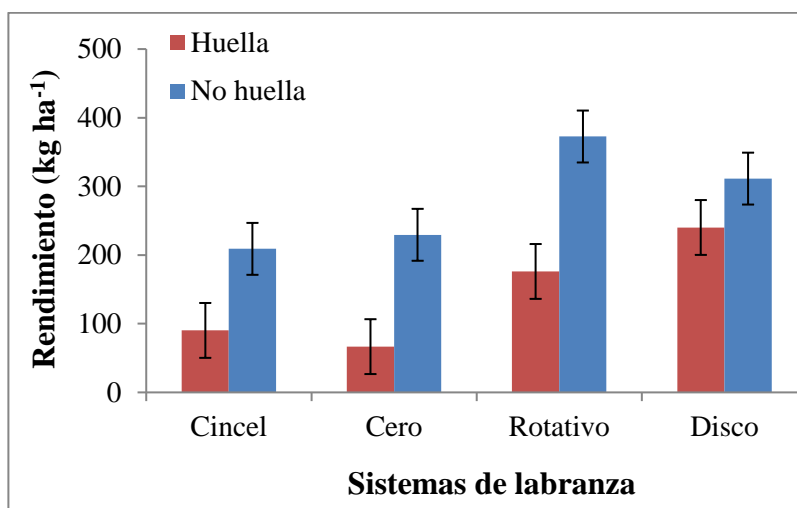


Figura 12. Promedio de rendimiento cosechado (kg ha⁻¹) obtenido para todos los sistemas de labranza en las zonas de NH y H2. Letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas ($\alpha < 0,05$).

Al igual que en la producción de biomasa, se observa una diferencia entre la producción de las zonas de huella con respecto a las de no huella, teniendo estas últimas valores superiores por más del doble de producción en todos los sistemas de labranza, exceptuando el sistema de Discos, donde se presentan valores más homogéneos, ya que la producción en la zona de no huella es solo 30% superior a la huella.

CONCLUSIONES

La implementación de cuatro sistemas de labranza (cero, disco, cincel, rotativo) en un suelo franco genera respuestas en las propiedades físicas que dependen del sistema de labranza, la huella de tránsito y la época de muestreo. Así, el contenido de agua del suelo disminuye hacia el final de la temporada, la densidad aparente es menor en los sistemas conservacionistas (cero y cincel) y la porosidad de aireación se incrementa en el tiempo como efecto de la re-estructuración post labranza.

El proceso de regeneración estructural a lo largo de la temporada incrementa la difusividad de oxígeno, donde la presencia de la huella al momento del establecimiento del cultivo genera grietas que aumentan los índices de continuidad para los sistemas de labranza con cincel (evaluación al inicio y final de temporada) y con disco (medición en la espigadura). Para un evento de tránsito a la espigadura, los sistemas de labranza cero y disco presentan efectos negativos, con disminuciones del índice de continuidad, aunque con valores mayores a 0,6 cuando el suelo está equilibrado a capacidad de campo, lo que es indicador de una buena continuidad porosa.

Estos resultados responden a la dinámica de regeneración estructural del suelo, en concordancia con los contenidos de materia orgánica, con niveles mayores a 2,5% en todos los casos, siendo mayores en labranza cero y disminuyendo en forma general hacia el final de la temporada, con diferencias por efecto de la huella en los sistemas cincel y cero en la medición de espigadura, con mayores niveles bajo la huella de tránsito.

Finalmente, la integración de las propiedades estáticas y dinámicas de suelo se ve reflejado en la producción de biomasa y rendimiento, siendo los sistemas convencionales (disco y rotativo) los que obtuvieron mayor producción. Las diferencias también responden al constante tránsito de maquinaria sobre el cultivo, siendo las zonas sin tránsito las que obtuvieron mayor producción tanto de biomasa aérea como de rendimiento, lo que ocurre producto de un menor deterioro de la estructura del suelo. Así, el índice de continuidad no necesariamente responde a la calidad estructural de manera integral, siendo necesario continuar con este tipo de investigaciones que ayuden a entender el efecto del agrietamiento por labranza.

BIBLIOGRAFIA

- Abid, M. and R. Lal. 2008. Tillage and drainage impact on soil quality I. Aggregate stability, carbon and nitrogen pools. Soil and Tillage Research. 100: 89-98.
- Acevedo, E., y P. Silva. 2003. Agronomía de la cero labranza. Universidad de Chile. Santiago, Chile.
- Ahuja L.R., F. Fiedler, G.H. Dunn, J.G. Benjamín, and A. Garrison. 1998. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. Soil Science Society American Journal. 62: 1228 – 1233.
- Alvarez, R., and H.S. 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 – 15.
- Allen, R., L. Pereira, D. Raes, and M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 298 pp.
- Alleto, L., and Y. Coquet. 2009. Temporal and spatial variability of soil bulk density and near-saturated hydraulic conductivity under two contrasted tillage management systems. Geoderma. 152: 85-94.
- Arah, J.R.M., and B.C. Ball. 1994. A functional model of soil porosity used to interpret measurements of gas diffusion. European Journal of Soil Science. 45 (2): 135 – 144.
- Balesdent, J., C. Chenu, and M. Balabane. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. Soil and Tillage Research. 53: 215 -230.
- Ball, B.C. 1981. Pore characteristics of soils from two cultivation experiments as shown by gas diffusivities and permeabilities and air-filled porosities. Journal of Soil Science. 32: 483-498.
- Ball, B.C., M.F. Osullivan and R. Hunter. 1988. Gas-diffusion, fluid-flow and derived pore continuity indexes in relation to vehicle traffic and tillage. Journal of Soil Science. 39(3): 327-339.
- Ball, B.C., R.W. Lang, M.F. O'Sullivan, and M.F. Franklin. 1989. Cultivation and nitrogen requirements for continuous winter barley on a gleysol and a cambisol. Soil and Tillage Research. 13: 333 – 352.
- Ball, B.C., and E.A.G. Robertson. 1994. Soil structural and transport properties associated with poor growth of oil-seed rape in soil direct drilled when wet. Soil and Tillage Research. 31: 119 – 133.
- 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.
- Blanco – Canqui, H., L.R. Stone, A.J. Schlegel, D.J. Lyon, M.F. Virgil, M.M. Mikha, P.W. Stahlman, and C.W. Rice. 2009. No-till induced increase in organic carbon reduces maximum bulk density of soils. Soil Science Society of America Journal. 73 (6): 1871 – 1879.
- Blanco – Canqui, H., T.M. Shaver, J.L. Lindquist, C.A. Shapiro, R.W. Elmore, C.A. Francis, and G.W. Hergert. 2015. Cover crops and ecosystems services: Insights from

- studies in temperate soils. Agronomy Journal. 107 (6) : 2449 - 2474.
- Bodner, G., P. Scholl, and H.P. Kaul. 2013. Field quantification of wetting-drying cycles to predict temporal changes of soil pore size distribution. Soil and Tillage Research. 133: 1- 9.
- Botta, G.F., A. Tolon – Becerra, X. Lastra – Bravo, and M. Tourn. 2010. Tillage and traffics effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. Soil and Tillage Research. 110: 167-174.
- Brunel – Saldias, N., O. Seguel, C. Ovalle, E. Acevedo, and I. Martínez. 2018. Tillage effects on the soil water balance and the use of water by oats and wheat in a Mediterranean climate. Soil and Tillage Research. 184: 68 – 77.
- Carter, M., and E. Gregorich. 2007. Soil Sampling and Methods of Analysis. Boca Raton: CRC Press.
- 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.
- Chen, H., R. Hou, Y. Gong, H. Li, M. Fan, and Y. Kuzyakov. 2009. Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China. Soil and Tillage Research. 106: 85 – 94.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 1996. Estudio Agrológico Región Metropolitana. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Publicación N°115. Santiago, Chile.
- Currie, J. 1960. Gaseous diffusion in porous media Part 1. - A non-steady state method. British Journal of Applied Physics. 11: 314- 317.
- Denef, K., J. Six, K. Paustian, and R. Merckx. 2001. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short – term effects of physical disturbance induced by dry – wet cycles. Soil Biology and Biochemistry. 33: 2145 – 2153.
- Dexter, A.R. 2004. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tilth and hard – setting. Geoderma. 120: 215 -225.
- Dörner, J., and R. Horn. 2006. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in N Germany. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 169(2): 213–220.
- Dörner, J., D. Dorota, E. Feest, N. Vásquez, and M. Díaz. 2012. Dynamics of soil structure and pore functions of a volcanic ash soil under tillage. Soil and Tillage Research. 125: 52-60.
- Faiguenbaum, H. 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. La Pintana. Santiago. Chile.
- Franzluebbers, A. 2002. Water infiltration and soil structure related to organic matter and its stratification with depth. Soil and Tillage Research. 66(2): 197–205.
- Franzluebbers, A. 2010. Achieving soil organic carbon sequestration with conservation agricultural systems in the Southeastern United States. Soil Society American Journal. 74: 347 – 357.
- Gao, L., E. Becker, G. Liang, A.A. Houssou, H. Wu, X. Wu, D. Cai, and A. Degré. 2017. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon. Geoderma. 288: 97–104.
- Gelcich, F., P. Estay, J.C. Cortés, J.P. Manzur, C. Salazar, J. Salvo, C. Campos, M. Fuentes

- y R. Ruiz. 2020. Boletín nacional de análisis de riesgos agroclimáticos para las principales especies frutales y cultivos y la ganadería. Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria. La Pintana, Chile.
- Gil, H., C.G. Martínez, and G. Campuzano. 2014. Impact of tillage systems and nitrogen doses on yield and nutritional quality of forage oats. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. 5 (6): 951 – 964.
- Hajnos, M., J. Lipiec, R. Swieboda, Z. Sokolowska, and B. Witkowska – Walczak. 2006. Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods. Geoderma. 135: 307 – 314.
- Hakansson, I. 2005. Machinery-induced compaction of arable soils, incidence – consequences – counter - measures. Swedish University of Agricultural Sciences, Reports from the Division of Soil Management, No.109.
- Hamamoto, S., P. Moldrup, K. Kawamoto, and T. Komatsu. 2012. Organic matter fraction dependent model for predicting the gas diffusion coefficient in variably saturated soils. Vadose Zone Journal. 11 (1).
- Hamza, M., and W. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. Soil and Tillage Research. 82: 121-145.
- Hartge, R. und R. Horn. 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. Praxis Messmethoden Auswertung. 4. vollst. Überarbeitete Auflage. Schweizerbart Vorlage, Stuttgart, 178p.
- Hernanz, J.L., R. López, L. Navarrete, and V. Sánchez – Girón. 2002. Long – term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central Spain. Soil and Tillage Research. 66: 129 – 141.
- Hillel, D. 2004. Environmental soil physics. Academic Press. San Diego. USA.
- Horn, R., and A. Smucker. 2005. Structure formation and its consequences for gas and water transport in unsaturated arable and forest soils. Soil and Tillage Research. 82: 5-14.
- 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: 201–208.
- Jury, W. and R. Horton. 2004. Soil Physics. 6th Ed. New Jersey. USA.
- Kay. B.D., and A.J. VandenBygaart. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. Soil and Tillage Research. 66: 107 – 118.
- Kayser, D., M. Rodrigues, J. Riechert, D. Reinert, R. Horn, H. Fleige et al., 2013. Soil physical capacity and intensity properties for achieving sustainable agriculture in the subtropics and tropics: A review. Advances in Geocology. 42: 282-339.
- Kreba, S.A., O. Wendroth, M.S. Coyne, and R. Walton. 2017. Soil gas diffusivity, air – filled porosity, and pore continuity: Land use and spatial patterns. Soil Science Society of America Journal. 81: 477 – 489.
- Kühne, A., H. Schack – Kirchner, and E.E. Hildebrand. 2012. Gas diffusivity in soils compared to ideal isotropic porous media. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 175(1): 34 – 45.
- La Scala Jr, N., A. Lopes, K. Spokas, D. Bolonhezi, D.W. Archer, and D.C. Reicosky. 2008. Short – term temporal changes of soil carbon losses after tillage described by a first – order decay model. Soil and Tillage Research. 99: 108 – 118.
- Lal, R., J. Kimball, R.E. Follett, and C.V. Cole. 1998. The potential of U.S. cropland to

- sequester carbon and mitigate the greenhouse effect, Sleeping Bear Press: Ann. Arbor., MI.
- Lal, R. 2016. Soil health and carbon management. Food and Energy Security. 5(4): 212-222.
- Lampurlanés, J. and C. Cantero – Martínez. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. Agronomy Journal. 95: 526-536.
- Mapa, R.B., R.E. Green, and L. Santo. 1986. Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage. Soil Science Society of America Journal. 50: 1133 – 1138.
- 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(2): 232-244.
- Moldrup, P., T. Olesen, S. Yoshikawa, T. Komatsu and D. Rolston. 2004. Three-Porosity model for predicting the gas diffusion coefficient in undisturbed soil. Soil Science Society American Journal. 68 (3) :750-759.
- Nimmo, J.R. 2004. Porosity and Pore size distribution. U.S Geological Survey. 3: 295 – 303.
- Osunbitan, J., D. Oyedele, and K. Adekalu. 2005. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. Soil and Tillage Research. 82: 57-64.
- Pagliai, M., and N. Vignozzi. 2002. The soil pore system as an indicator of soil quality. pp. 71–82 In: Pagliai M and Jones R (eds.) Sustainable land management - environmental protection—a soil physical approach. Reiskirchen, Germany: Catena Verlag.
- Pagliai, M., N. Vignozzi, and S. Pellegrini. 2004. Soil structure and the effect of management practices. Soil and Tillage Research. 79: 131 – 143.
- Peña – Sancho, C., M.V. López, R. Gracia, and D. Moret-Fernández. 2016. Effects of tillage on the soil water retention curve during a fallow period of a semiarid dryland. Soil Research. 55 (2): 114 - 123.
- Piccoli, I., P. Schjonning, M. Lamandé, L. Furlan, and F. Morari. 2017. Challenges of conservation agriculture practices on silty soils. Effects on soil pore and gas transport characteristics in North – eastern Italy. Soil and Tillage Research. 172: 12 -21.
- Pires L.F., O.O.S. Bacchi, and K. Reichardt. 2005. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B. 42: 857-863.
- Reicosky, D.C. 2002. Long – Term effect of Moldboard plowing on tillage – induced CO₂ Loss. pp. 87 – 96 In: J.M. Kimble, R. Lal and R.F. Follet: Agricultural Practices and Policies for Carbon Sequestration in Soil. Lewis Publishers. Papers from symposium held July 1999 at Ohio State University, Columbus, Ohio.
- 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(3-4): 252–263.
- Rolston, D.E. and P. Moldrup. 2002. 4.3 Gas Diffusivity. pp: 1113-1139 In: J. H. Dane and C. G. Topp, editors, Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods. Soil Science Society of America.
- Romero, R., P. Silva, and O. Seguel. 2016. Waterlogging and its effect on the physiology, growth and yield of wheat in Mediterranean zones managed under no tillage. Agro Sur.

- 44(1): 47 – 57.
- Sadzawka, A., M.A. Carrasco, R. Grez, R., M.L. Mora, H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile.. Ministerio de Agricultura, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Serie Actas INIA – N° 34. Centro Regional de Investigación La Platina, Santiago.
- Sandoval, M., J. Dörner, O. Seguel, J. Cuevas y D. Rivera. 2012. Métodos de análisis físicos de suelos. Chile: Departamento de Suelos y Recursos Naturales, Universidad de Concepción. Chillán. (Publicación N° 5).
- Santibañez, F., P. Santibañez, C. Caroca y P. González. 2017. Atlas Agroclimático de Chile: Estado actual y tendencias del clima. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule. Universidad de Chile. Santiago, La Pintana, Chile.
- Sasal, M.C., A.E. Andriulo and M.A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research*. 87: 9 – 18.
- Schjonning, P., and K.J. Rasmussen. 2000. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil and Tillage Research*. 57: 69-82.
- Schoeneberger, P., D. Wysocki, E. Benham and Soil Survey Staff, 2012. Field book for describing and sampling soils, Version 3.0. Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE.
- Seguel, O., and R. Horn. 2006. Structure properties and pore dynamics in aggregate beds due to wetting and drying cycles. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 169: 221-232.
- Six, J., E.T. Elliott, and K. Paustian. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Science Society of American Journal*. 63: 1350–1358.
- Six, J., H. Bossuyt, S. Degryze, and K. Denef. 2004. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. *Soil and Tillage Research* 79: 7-31.
- Thorbjorn, A., P. Moldrup, H. Blendstrup, T. Komatsu, and D. Rolston. 2008. A gas diffusivity model based on air, solid, and water – phase resistance in variably saturated soil. *Vadose Zone Journal*. 7: 1276 – 1286.
- Uteau, D., S.K. Pagenkemper, S. Peth, and R. Horn. 2013. Root and time dependent soil structure formation and its influence on gas transport in the subsoil. *Soil and Tillage Research*. 132: 69 – 76.

APÉNDICES

Apéndice 1. Análisis a través de modelos líneas mixtos para el contenido de agua durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	32	167,09	<0,0001
Labranza	3	8	0,30	0,8251
Posicion	1	8	2,98	0,1228
Tiempo	2	32	89,21	<0,0001
Labranza:Posicion	3	8	0,40	0,7595
Labranza:Tiempo	6	32	0,19	0,9769
Posicion:Tiempo	2	32	1,20	0,3149
Labranza:Posicion:Tiempo	6	32	0,58	0,7417

Apéndice 2. Análisis a través de modelos líneas mixtos para el contenido de agua durante la temporada para H3.

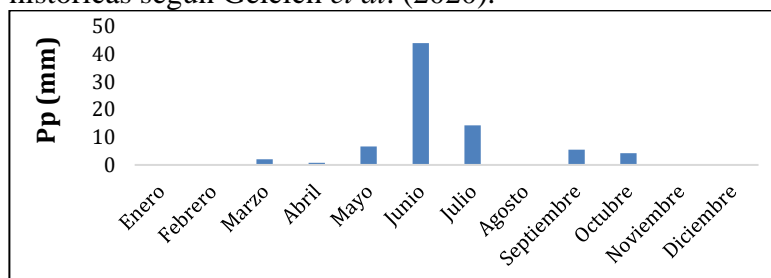
Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8	74,16	<0,0001
Labranza	3	8	0,12	0,9438
Tiempo	1	8	40,07	0,0002
Labranza:Tiempo	3	8	0,10	0,9597

Apéndice 3. Promedios obtenidos de contenido de agua (%) para todos los sistemas de labranza y en todas las posiciones de huella, en todos los momentos de medición.

Sist. labranza	Posición huella	Contenido de agua		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
(%)				
Cincel	Fuera (NH)	6,12 (± 1,38)	11,32 (± 9,53)	1,54 (± 0,51)
	Huella inicial (H2)	6,88 (± 2,47)	12,62 (± 2,68)	2,02 (± 0,75)
	Espigadura (H3)	-	13,56 (± 1,33)	1,57 (± 0,18)
Cero	Fuera (NH)	7,34 (± 1,16)	13,01 (± 2,74)	2,19 (± 0,49)
	Huella inicial (H2)	8,34 (± 1,51)	14,85 (± 5,44)	3,54 (± 2,48)
	Espigadura (H3)	-	13,32 (± 10,47)	3,04 (± 1,72)
Rotativo	Fuera (NH)	6,90 (± 1,61)	12,68 (± 0,83)	1,88 (± 0,26)
	Huella inicial (H2)	6,81 (± 1,63)	13,39 (± 1,73)	1,96 (± 0,45)
	Espigadura (H3)	-	14,25 (± 3,99)	1,86 (± 0,35)
Disco	Fuera (NH)	6,41 (± 0,33)	10,32 (± 6,81)	1,24 (± 1,00)
	Huella inicial (H2)	6,26 (± 0,11)	17,24 (± 7,18)	1,28 (± 0,90)
	Espigadura (H3)	-	11,97 (± 4,59)	1,64 (± 0,49)

Apéndice 4. Figura de precipitaciones mensuales (Pp, mm) medidas el año 2019 y las medias históricas según Gelcich *et al.* (2020).



Apéndice 5. Análisis a través de modelos lineales mixtos para la densidad aparente durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	32	10471,61	<0,0001
Labranza	3	8	7,08	0,0122
Posicion	1	8	2,09	0,1863
Tiempo	2	32	1,73	0,1940
Labranza:Posicion	3	8	1,07	0,4161
Labranza:Tiempo	6	32	1,59	0,1810
Posicion:Tiempo	2	32	2,39	0,1082
Labranza:Posicion:Tiempo	6	32	0,50	0,8059

Apéndice 6. Análisis a través de modelos lineales mixtos para la densidad aparente durante la temporada para H3.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8	4042,81	<0,0001
Labranza	3	8	0,86	0,5012
Tiempo	1	8	4,59	0,0646
Labranza:Tiempo	3	8	1,55	0,2761

Apéndice 7. Promedios obtenidos de densidad aparente (Mg m^{-3}) para todos los sistemas de labranza y en todas las posiciones de huella, en todos los momentos de medición.

Sist.	Posición huella	Densidad aparente (Mg m^{-3})		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
Labranza Cincel	Fuera (NH)	1,17 ($\pm 0,07$)	1,17 ($\pm 0,10$)	1,23 ($\pm 0,07$)
	Huella inicial (H2)	1,15 ($\pm 0,07$)	1,21 ($\pm 0,07$)	1,19 ($\pm 0,06$)
	Espigadura (H3)	-	1,22 ($\pm 0,09$)	1,18 ($\pm 0,10$)
Labranza Cero	Fuera (NH)	1,10 ($\pm 0,04$)	1,07 ($\pm 0,14$)	1,19 ($\pm 0,11$)
	Huella inicial (H2)	1,20 ($\pm 0,04$)	1,12 ($\pm 0,08$)	1,23 ($\pm 0,07$)
	Espigadura (H3)	-	1,17 ($\pm 0,07$)	1,35 ($\pm 0,09$)
Labranza Rotativo	Fuera (NH)	1,26 ($\pm 0,08$)	1,23 ($\pm 0,06$)	1,33 ($\pm 0,09$)
	Huella inicial (H2)	1,28 ($\pm 0,06$)	1,25 ($\pm 0,06$)	1,27 ($\pm 0,14$)
	Espigadura (H3)	-	1,23 ($\pm 0,13$)	1,33 ($\pm 0,06$)
Labranza Disco	Fuera (NH)	1,29 ($\pm 0,06$)	1,22 ($\pm 0,09$)	1,27 ($\pm 0,14$)
	Huella inicial (H2)	1,33 ($\pm 0,03$)	1,37 ($\pm 0,02$)	1,23 ($\pm 0,03$)
	Espigadura (H3)	-	1,25 ($\pm 0,05$)	1,32 ($\pm 0,13$)

Apéndice 8. Promedios obtenidos de densidad real (Mg m^{-3}) determinados para el estudio.

Sist. labranza	Posición huella	Densidad real
		(Mg m^{-3})
Cincel	Fuera (NH)	2,52 ($\pm 0,15$)
	Huella inicial (H2)	2,52 ($\pm 0,03$)
	Espigadura (H3)	2,52 ($\pm 0,00$)
Cero	Fuera (NH)	2,46 ($\pm 0,08$)
	Huella inicial (H2)	2,59 ($\pm 0,09$)
	Espigadura (H3)	2,53 ($\pm 0,00$)
Rotativo	Fuera (NH)	2,50 ($\pm 0,07$)
	Huella inicial (H2)	2,48 ($\pm 0,09$)
	Espigadura (H3)	2,49 ($\pm 0,00$)
Disco	Fuera (NH)	2,63 ($\pm 0,07$)
	Huella inicial (H2)	2,57 ($\pm 0,01$)
	Espigadura (H3)	2,60 ($\pm 0,00$)

Apéndice 9. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para la porosidad total durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	32	14156,72	<0,0001
Labranza	3	8	8,07	0,0084
Posicion	1	8	0,45	0,5207
Tiempo	2	32	1,27	0,2949
Labranza:Posicion	3	8	0,41	0,7476
Labranza:Tiempo	6	32	1,82	0,1274
Posicion:Tiempo	2	32	1,63	0,2121
Labranza:Posicion:Tiempo	6	32	0,17	0,9818

Apéndice 10. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para la porosidad total durante la temporada para H3.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8	4272,55	<0,0001
Labranza	3	8	1,02	0,4334
Tiempo	1	8	4,59	0,0645
Labranza:Tiempo	3	8	1,57	0,2701

Apéndice 11. Promedios obtenidos de porosidad total (%) para todos los sistemas de labranza, en todas las posiciones de la huella, durante la temporada.

Sist. labranza	Posición huella	Porosidad total		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
		(%)		
Cinzel	Fuera (NH)	53,64 (± 3,66)	53,68 (± 4,16)	51,26 (± 1,05)
	Huella inicial (H2)	54,31 (± 3,07)	51,80 (± 3,20)	52,58 (± 2,23)
	Espigadura (H3)	-	51,40 (± 3,48)	53,07 (± 4,00)
Cero	Fuera (NH)	55,19 (± 1,14)	56,89 (± 4,14)	51,44 (± 5,27)
	Huella inicial (H2)	53,69 (± 0,10)	56,73 (± 2,90)	52,61 (± 1,26)
	Espigadura (H3)	-	53,89 (± 2,73)	46,60 (± 3,63)
Rotativo	Fuera (NH)	49,67 (± 3,92)	50,66 (± 1,97)	46,54 (± 4,90)
	Huella inicial (H2)	48,67 (± 0,55)	49,79 (± 3,39)	48,57 (± 7,46)
	Espigadura (H3)	-	50,55 (± 5,05)	46,36 (± 2,29)
Disco	Fuera (NH)	51,10 (± 3,03)	51,38 (± 3,19)	51,69 (± 4,17)
	Huella inicial (H2)	48,44 (± 0,60)	46,88 (± 0,56)	52,10 (± 0,96)
	Espigadura (H3)	-	52,16 (± 1,87)	49,27 (± 5,18)

Apéndice 12. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para los poros de drenaje rápido durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	32	3484,2155	<0,0001
Labranza	3	8	9,2417	0,0056
Posicion	1	8	2,7207	0,1377
Tiempo	2	32	18,3570	<0,0001
Labranza:Posicion	3	8	0,9434	0,4640
Labranza:Tiempo	6	32	0,8233	0,5604
Posicion:Tiempo	2	32	0,3206	0,7280
Labranza:Posicion:Tiempo	6	32	1,2951	0,2876

Apéndice 13. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para los poros de drenaje rápido durante la temporada para H3.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8	452,65	<0,0001
Labranza	3	8	1,16	0,3824
Tiempo	1	8	1,11	0,3232
Labranza:Tiempo	3	8	0,79	0,5320

Apéndice 14. Promedios obtenidos de poros de drenaje rápido (%) para todos los sistemas de labranza, en todas las posiciones de la huella, durante la temporada.

Sist.	Posición huella	PDR		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
Labranza		(%)		
Cinzel	Fuera (NH)	16,02 (± 1,41)	14,48 (± 3,45)	20,58 (± 4,96)
	Huella inicial (H2)	15,09 (± 2,21)	19,31 (± 2,22)	18,34 (± 3,25)
	Espigadura (H3)	-	17,29 (± 2,56)	16,87 (± 2,57)
Cero	Fuera (NH)	18,80 (± 4,87)	20,33 (± 1,97)	20,51 (± 1,75)
	Huella inicial (H2)	17,29 (± 2,98)	19,92 (± 1,36)	20,07 (± 0,93)
	Espigadura (H3)	-	14,87 (± 5,08)	17,12 (± 3,76)
Rotativo	Fuera (NH)	12,48 (± 1,14)	16,66 (± 1,44)	18,63 (± 3,11)
	Huella inicial (H2)	12,51 (± 0,72)	13,26 (± 0,30)	17,21 (± 1,63)
	Espigadura (H3)	-	13,68 (± 1,72)	15,85 (± 1,87)
Disco	Fuera (NH)	15,53 (± 1,48)	19,31 (± 1,39)	21,48 (± 0,71)
	Huella inicial (H2)	13,68 (± 1,14)	16,87 (± 4,50)	19,58 (± 2,64)
	Espigadura (H3)	-	18,95 (± 3,43)	18,53 (± 2,19)

Apéndice 15. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para los poros de drenaje lento durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	32	625,7532	<0,0001
Labranza	3	8	0,8761	0,4928
Posicion	1	8	0,1822	0,6807
Tiempo	2	32	26,3187	<0,0001
Labranza:Posicion	3	8	0,4298	0,7373
Labranza:Tiempo	6	32	0,8093	0,5704
Posicion:Tiempo	2	32	0,8620	0,4319
Labranza:Posicion:Tiempo	6	32	0,7975	0,5790

Apéndice 16. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para los poros de drenaje lento durante la temporada para H3.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8	1159,63	<0,0001
Labranza	3	8	7,89	0,0089
Tiempo	1	8	20,37	0,0020
Labranza:Tiempo	3	8	3,47	0,0706

Apéndice 17. Promedios obtenidos de poros de drenaje lento (%) para todos los sistemas de labranza, en todas las posiciones de la huella, durante la temporada.

Sist.	Posición huella	PDL		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
Labranza				(%)
Cinzel	Fuera (NH)	6,90 (\pm 5,56)	11,41 (\pm 3,32)	12,14 (\pm 1,60)
	Huella inicial (H2)	5,02 (\pm 4,97)	10,02 (\pm 1,68)	12,97 (\pm 1,40)
	Espigadura (H3)	-	7,68 (\pm 0,96)	13,48 (\pm 1,66)
Cero	Fuera (NH)	3,10 (\pm 3,39)	7,92 (\pm 0,16)	11,93 (\pm 1,71)
	Huella inicial (H2)	8,34 (\pm 4,30)	6,73 (\pm 0,58)	11,54 (\pm 1,65)
	Espigadura (H3)	-	6,46 (\pm 1,67)	9,58 (\pm 0,71)
Rotativo	Fuera (NH)	5,71 (\pm 3,74)	9,90 (\pm 0,99)	13,51 (\pm 1,73)
	Huella inicial (H2)	6,73 (\pm 4,08)	8,98 (\pm 0,78)	13,34 (\pm 2,24)
	Espigadura (H3)	-	10,34 (\pm 2,61)	11,12 (\pm 0,34)
Disco	Fuera (NH)	5,34 (\pm 3,94)	9,58 (\pm 1,52)	11,38 (\pm 1,89)
	Huella inicial (H2)	7,19 (\pm 5,27)	11,31 (\pm 2,36)	10,17 (\pm 1,89)
	Espigadura (H3)	-	11,48 (\pm 1,86)	12,78 (\pm 0,66)

Apéndice 18. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para los poros de agua útil durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	32	1038,8907	<0,0001
Labranza	3	8	0,8423	0,5081
Posicion	1	8	0,0314	0,8637
Tiempo	2	32	24,6749	<0,0001
Labranza:Posicion	3	8	0,6149	0,6244
Labranza:Tiempo	6	32	0,2207	0,9673
Posicion:Tiempo	2	32	1,3342	0,2776
Labranza:Posicion:Tiempo	6	32	0,5580	0,7602

Apéndice 19. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para los poros de agua útil durante la temporada para H3.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8	191,17	<0,0001
Labranza	3	8	1,39	0,3147
Tiempo	1	8	0,38	0,5529
Labranza:Tiempo	3	8	1,88	0,2113

Apéndice 20. Promedios obtenidos de poros de agua útil (%) para todos los sistemas de labranza, en todas las posiciones de la huella, durante la temporada.

Sist.	Posición huella	PAU		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
		(%)		
Cinzel	Fuera (NH)	17,55 (± 6,79)	12,10 (± 0,97)	10,66 (± 1,19)
	Huella inicial (H2)	18,98 (± 5,58)	16,00 (± 7,94)	10,85 (± 1,08)
	Espigadura (H3)	-	13,26 (± 2,96)	18,42 (± 8,31)
Cero	Fuera (NH)	20,02 (± 5,02)	12,03 (± 2,72)	10,51 (± 0,11)
	Huella inicial (H2)	14,58 (± 1,84)	14,15 (± 1,14)	11,60 (± 0,82)
	Espigadura (H3)	-	15,15 (± 4,01)	12,32 (± 2,69)
Rotativo	Fuera (NH)	5,71 (± 3,74)	9,90 (± 0,99)	13,51 (± 1,73)
	Huella inicial (H2)	6,73 (± 4,08)	8,98 (± 0,78)	13,34 (± 2,24)
	Espigadura (H3)	-	10,34 (± 2,61)	11,12 (± 0,34)
Disco	Fuera (NH)	17,44 (± 3,47)	11,55 (± 1,87)	10,66 (± 0,13)
	Huella inicial (H2)	16,25 (± 4,43)	10,52 (± 1,63)	9,83 (± 0,69)
	Espigadura (H3)	-	10,84 (± 2,20)	10,13 (± 0,42)

Apéndice 21. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para la difusividad de oxígeno (Dp/D0) durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	80	2854,6052	<0,0001
Labranza	3	8	0,5431	0,6663
Posicion	1	8	0,9812	0,3509
Tiempo	2	80	167,3722	<0,0001
Tension	1	80	417,4426	<0,0001
Labranza:Posicion	3	8	0,3699	0,7770
Labranza:Tiempo	6	80	0,6046	0,7259
Labranza:Tension	3	80	0,5711	0,6357
Posicion:Tiempo	2	80	0,5820	0,5611
Posicion:Tension	1	80	5,3360	0,0235
Tiempo:Tension	2	80	20,1544	<0,0001
Labranza:Posicion:Tiempo	6	80	1,1440	0,3448
Labranza:Posicion:Tension	3	80	2,0416	0,1147
Labranza:Tiempo:Tension	6	80	1,8124	0,1071
Posicion:Tiempo:Tension	2	80	0,3939	0,6757
Labranza:Posicion:Tiempo:T..	6	80	0,4818	0,8200

Apéndice 22. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para la difusividad de oxígeno (Dp/D0) durante la temporada para H3.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	2244,169	<0,0001
Labranza	3	8	2,371	0,1463
Tiempo	1	24	9,239	0,0056
Tension	1	24	135,740	<0,0001
Labranza:Tiempo	3	24	0,454	0,7168
Labranza:Tension	3	24	1,323	0,2901
Tiempo:Tension	1	24	0,461	0,5035
Labranza:Tiempo:Tension	3	24	0,916	0,4480

Apéndice 23. Promedios obtenidos para D_p/D_0 para los cuatro sistemas de labranza en todas las posiciones y momentos de medición.

Sist. Labranza	Posición huella	D_p/D_0		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
Cinzel	Fuera (NH)	0,086 (\pm 0,02)	0,156 (\pm 0,05)	0,176 (\pm 0,05)
	Huella inicial (H2)	0,112 (\pm 0,05)	0,153 (\pm 0,06)	0,178 (\pm 0,05)
	Espigadura (H3)	-	0,119 (\pm 0,02)	0,136 (\pm 0,01)
Cero	Fuera (NH)	0,096 (\pm 0,03)	0,134 (\pm 0,04)	0,176 (\pm 0,04)
	Huella inicial (H2)	0,096 (\pm 0,02)	0,153 (\pm 0,06)	0,175 (\pm 0,06)
	Espigadura (H3)	-	0,115 (\pm 0,02)	0,126 (\pm 0,00)
Rotativo	Fuera (NH)	0,096 (\pm 0,02)	0,146 (\pm 0,07)	0,173 (\pm 0,05)
	Huella inicial (H2)	0,099 (\pm 0,02)	0,139 (\pm 0,07)	0,176 (\pm 0,05)
	Espigadura (H3)	-	0,107 (\pm 0,02)	0,144 (\pm 0,02)
Disco	Fuera (NH)	0,101 (\pm 0,02)	0,128 (\pm 0,04)	0,173 (\pm 0,06)
	Huella inicial (H2)	0,099 (\pm 0,02)	0,141 (\pm 0,05)	0,163 (\pm 0,04)
	Espigadura (H3)	-	0,122 (\pm 0,02)	0,122 (\pm 0,04)

Apéndice 24. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para el índice de continuidad de poros durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	80	545,26	<0,0001
Labranza	3	8	1,43	0,3044
Posicion	1	8	5,37	0,0491
Tiempo	2	80	5,33	0,0067
Tension	1	80	0,32	0,5762
Labranza:Posicion	3	8	4,47	0,0401
Labranza:Tiempo	6	80	1,80	0,1103
Labranza:Tension	3	80	0,38	0,7666
Posicion:Tiempo	2	80	0,76	0,4700
Posicion:Tension	1	80	1,03	0,3128
Tiempo:Tension	2	80	0,69	0,5047
Labranza:Posicion:Tiempo	6	80	3,90	0,0018
Labranza:Posicion:Tension	3	80	1,27	0,2888
Labranza:Tiempo:Tension	6	80	0,14	0,9900
Posicion:Tiempo:Tension	2	80	0,23	0,7951
Labranza:Posicion:Tiempo:T..	6	80	0,81	0,5622

Apéndice 25. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para el índice de continuidad de poros durante la temporada para H3

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	24	449,20	<0,0001
Labranza	3	8	1,37	0,3202
Tiempo	1	24	0,13	0,7220
Tension	1	24	2,42	0,1329
Labranza:Tiempo	3	24	1,26	0,3114
Labranza:Tension	3	24	2,01	0,1397
Tiempo:Tension	1	24	1,05	0,3161
Labranza:Tiempo:Tension	3	24	3,54	0,0297

Apéndice 26. Promedios obtenidos de porosidad llena de aire (cm^3/cm^3) para todos los sistemas de labranza, en todas las posiciones de la huella, durante la temporada.

Sist.	Posición huella	Porosidad llena de aire (cm^3/cm^3)		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
Labranza				
	Cinzel			
Cero	Fuera (NH)	0,207 ($\pm 0,06$)	0,175 ($\pm 0,08$)	0,256 ($\pm 0,05$)
	Huella inicial (H2)	0,111 ($\pm 0,05$)	0,204 ($\pm 0,08$)	0,112 ($\pm 0,04$)
	Espigadura (H3)	-	0,150 ($\pm 0,07$)	0,212 ($\pm 0,03$)
Rotativo	Fuera (NH)	0,205 ($\pm 0,06$)	0,232 ($\pm 0,07$)	0,205 ($\pm 0,10$)
	Huella inicial (H2)	0,169 ($\pm 0,04$)	0,194 ($\pm 0,08$)	0,235 ($\pm 0,07$)
	Espigadura (H3)	-	0,119 ($\pm 0,06$)	0,221 ($\pm 0,07$)
Rotativo	Fuera (NH)	0,114 ($\pm 0,05$)	0,150 ($\pm 0,07$)	0,208 ($\pm 0,05$)
	Huella inicial (H2)	0,166 ($\pm 0,04$)	0,087 ($\pm 0,05$)	0,177 ($\pm 0,07$)

Disco	Espigadura (H3)	-	0,179 (\pm 0,09)	0,146 (\pm 0,07)
	Fuera (NH)	0,147 (\pm 0,07)	0,181 (\pm 0,10)	0,262 (\pm 0,05)
	Huella inicial (H2)	0,126 (\pm 0,04)	0,168 (\pm 0,08)	0,181 (\pm 0,07)
	Espigadura (H3)	-	0,201 (\pm 0,08)	0,248 (\pm 0,04)

Apéndice 27. Promedio de índice de continuidad para los sistemas de labranza en NH y H2 en los 3 momentos de medición en la temporada.

Momento de medición	Posición	Tiempo de medición	Índice de continuidad	
Establecimiento	NH	Cinzel	0,44 (\pm 0,10)	c
		Cero	0,50 (\pm 0,16)	bc
		Rotativo	0,86 (\pm 0,19)	a
		Disco	0,77 (\pm 0,25)	ab
	H2	Cinzel	0,92 (\pm 0,12)	a
		Cero	0,58 (\pm 0,13)	bc
		Rotativo	0,61 (\pm 0,11)	ab
		Disco	0,82 (\pm 0,18)	ab
Espigadura	NH	Cinzel	0,85 (\pm 0,20)	ab
		Cero	0,57 (\pm 0,08)	bc
		Rotativo	1,00 (\pm 0,51)	a
		Disco	0,54 (\pm 0,32)	c
	H2	Cinzel	0,75 (\pm 0,16)	bc
		Cero	0,77 (\pm 0,14)	b
		Rotativo	0,82 (\pm 0,18)	ab
		Disco	0,84 (\pm 0,15)	ab
Cosecha	NH	Cinzel	0,69 (\pm 0,16)	b
		Cero	0,80 (\pm 0,21)	ab
		Rotativo	0,83 (\pm 0,15)	ab
		Disco	0,65 (\pm 0,13)	b
	H2	Cinzel	1,00 (\pm 0,00)	a
		Cero	0,73 (\pm 0,19)	ab
		Rotativo	0,91 (\pm 0,16)	ab
		Disco	0,89 (\pm 0,16)	ab

Apéndice 28. Índice de continuidad para las tensiones 60 y 330, para todos los sistemas de labranza al momento de espigadura y cosecha.

Tensión (hPa)	Momento	Labranza	Índice de Continuidad
60	Espigadura	Cinzel	0,93 (\pm 0,12) a
		Cero	0,61 (\pm 0,54) bc
		Rotativo	0,84 (\pm 0,28) abc
		Disco	0,86 (\pm 0,14) ab
	Cosecha	Cinzel	0,73 (\pm 0,08) abc
		Cero	0,73 (\pm 0,20) abc
		Rotativo	0,97 (\pm 0,05) a
		Disco	0,56 (\pm 0,18) c
330	Espigadura	Cinzel	0,93 (\pm 0,11) a
		Cero	1,00 (\pm 0,00) a
		Rotativo	0,79 (\pm 0,19) ab
		Disco	0,61 (\pm 0,04) b
	Cosecha	Cinzel	0,96 (\pm 0,04) a
		Cero	0,79 (\pm 0,13) ab
		Rotativo	0,92 (\pm 0,13) ab
		Disco	0,77 (\pm 0,05) ab

Apéndice 29. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para la materia orgánica durante la temporada para NH y H2.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	32	997,13	<0,0001
Labranza	3	8	1,95	0,2007
Posicion	1	8	5,35	0,0494
Tiempo	2	32	4,11	0,0258
Labranza:Posicion	3	8	0,76	0,5457
Labranza:Tiempo	6	32	1,27	0,3003
Posicion:Tiempo	2	32	4,90	0,0139
Labranza:Posicion:Tiempo	6	32	2,78	0,0273

Apéndice 30. Análisis estadístico a través de modelos lineales mixtos para la materia orgánica durante la temporada para H3.

Pruebas de hipótesis marginales (SC tipo III)

	numDF	denDF	F-value	p-value
(Intercept)	1	8	350,11	<0,0001
Labranza	3	8	2,24	0,1609
Tiempo	1	8	1,92	0,2029
Labranza:Tiempo	3	8	2,11	0,1774

Apéndice 31. Promedios obtenidos materia orgánica (%) para todos los sistemas de labranza, en todas las posiciones de la huella, durante la temporada.

Sist. Labranza	Posición huella	Materia orgánica		
		Establecimiento	Espigadura	Cosecha
		(%)		
Cinzel	Fuera (NH)	3,25 (± 0,36)	2,90 (± 0,28)	2,75 (± 0,17)
	Huella inicial (H2)	2,72 (± 0,38)	3,79 (± 0,75)	2,69 (± 0,48)
	Espigadura (H3)	-	4,12 (± 1,45)	3,11 (± 0,60)
Cero	Fuera (NH)	3,37 (± 0,39)	3,02 (± 0,47)	3,17 (± 0,10)
	Huella inicial (H2)	3,48 (± 0,27)	4,95 (± 1,86)	3,02 (± 0,35)
	Espigadura (H3)	-	3,55 (± 0,34)	4,60 (± 1,40)
Rotativo	Fuera (NH)	3,15 (± 0,99)	2,59 (± 0,32)	2,69 (± 0,41)
	Huella inicial (H2)	3,03 (± 0,07)	3,29 (± 0,82)	2,74 (± 0,28)
	Espigadura (H3)	-	3,29 (± 1,09)	4,48 (± 0,63)
Disco	Fuera (NH)	2,76 (± 0,28)	3,05 (± 0,45)	2,64 (± 0,52)
	Huella inicial (H2)	3,13 (± 0,36)	2,80 (± 0,41)	3,34 (± 0,10)
	Espigadura (H3)	-	2,42 (± 0,16)	3,13 (± 0,58)

Apéndice 32. Análisis estadístico a través de un ANDEVA para la biomasa cosechada.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	22,95	7	3,28	3,30	0,0226
Sist. labranza	15,79	3	5,26	5,30	0,0099
Posición	5,88	1	5,88	5,92	0,0270
Sist. labranza*Posición	1,28	3	0,43	0,43	0,7348
Error	15,88	16	0,99		
Total	38,83	23			

Apéndice 33. Análisis estadístico a través de un ANDEVA para el rendimiento cosechado.

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	222011,19	7	31715,88	0,93	0,5093
Tratamiento	95572,87	3	31857,62	0,94	0,4465
Posición	113125,59	1	113125,59	3,32	0,0871
Tratamiento*Posición	13312,73	3	4437,58	0,13	0,9407
Error	544861,81	16	34053,86		
Total	766873,00	23			

Apéndice 34. Promedio de Biomasa (ton ha^{-1}) y Rendimiento (kg ha^{-1}) para cada sistema de labranza y posición de la huella.

Sist. Labranza	Posición	Rendimiento (kg ha^{-1})	Biomasa (ton ha^{-1})
Cinzel	NH	209,02 ($\pm 197,17$)	3,05 ($\pm 1,93$)
	H2	90,27 ($\pm 33,03$)	2,09 ($\pm 0,18$)
Cero	NH	229,51 ($\pm 95,61$)	1,74 ($\pm 0,25$)
	H2	66,67 ($\pm 10,23$)	1,07 ($\pm 0,49$)
Rotativo	NH	372,62 ($\pm 342,64$)	4,51 ($\pm 1,10$)
	H2	176,13 ($\pm 121,41$)	2,76 ($\pm 0,46$)
Disco	NH	311,33 ($\pm 292,46$)	3,28 ($\pm 1,49$)
	H2	240,18 ($\pm 74,45$)	2,70 ($\pm 0,49$)