

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFECTO DE LA DESCOMPACTACIÓN  
SUB-SUPERFICIAL SOBRE EL RENDIMIENTO DE TRIGO Y LA  
RESPUESTA AL NITRÓGENO

por

Enzo ARMAND HUGON MALACRIA

TESIS presentada como uno de  
los requisitos para obtener el  
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2018

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Oswaldo Ernst

-----

Ing. Agr. Esteban Hoffman

-----

Ing. Agr. Luciano Dabala

Fecha: 7 de diciembre de 2018

Autor: -----

Enzo Armand Hugon Malacria

## AGRADECIMIENTOS

A mi tutor de tesis, Oswaldo Ernst por todo el apoyo durante la realización de esta tesis.

A Ramiro Izaguirre y Pilar Etchegoimberry por la ayuda brindada en la realización de la parte práctica de este trabajo.

A Luciano Dabala por el apoyo dado durante todo el trabajo.

A mi familia y amigos, por haber formado parte de esta etapa.

A mis padres, por haber hecho todo esto posible.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	2
2.1. CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN.....	2
2.2. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN .....	4
2.2.1. <u>Efecto en el suelo</u> .....	4
2.2.2. <u>Efecto en plantas</u> .....	6
2.3. FORMAS DE REMEDIAR LA COMPACTACIÓN .....	7
2.4. HIPÓTESIS .....	11
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	12
3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL.....	12
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS.....	12
3.3. MANEJO DEL CULTIVO .....	15
3.4. DETERMINACIONES REALIZADAS .....	15
3.4.1. <u>A nivel del suelo</u> .....	15
3.4.2. <u>A nivel de planta</u> .....	15
4. <u>RESULTADOS</u> .....	17
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AÑO.....	17
4.2. RESULTADOS .....	18
4.2.1. <u>Aporte de nitrógeno desde el suelo y estado nutricional del cultivo</u> .....	18
4.2.2. <u>Rendimiento y sus componentes</u> .....	22
5. <u>DISCUSIÓN</u> .....	27
6. <u>CONCLUSIONES</u> .....	30
7. <u>RESUMEN</u> .....	31
8. <u>SUMMARY</u> .....	32

9. BIBLIOGRAFÍA.....33

## LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.	Página
1 Planificación de los tratamientos .....	12
2 Tratamientos finales.....	13
3 Interacción entre sitio y laboreo y su efecto en la concentración de N-NO <sub>3</sub> en suelo y %N en planta.....	18
4 Efecto de año y laboreo sobre la concentración de N-NO <sub>3</sub> en suelo y %N en planta.....	18
5 Efecto de las diferentes dosis de nitrógeno agregado sobre la concentración de N-NO <sub>3</sub> medido en diferentes estadios de la planta. ....	19
6 Interacción entre año y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre la concentración de N-NO <sub>3</sub> en diferentes estadios de la planta.....	19
7 Interacción entre descompactación y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre la concentración de N-NO <sub>3</sub> en diferentes estadios de la planta. ....	20
8 Efecto de las diferentes dosis de nitrógeno agregado sobre las diferentes variables medidas.....	23
9 Interacción entre año y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre diferentes variables medidas. ....	23
10 Interacción entre descompactación y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre diferentes variables medidas. ....	24
11 Efecto de año y descompactación sobre diferentes variables medidas. ....	24
12 Interacción entre sitio y descompactación y su efecto sobre diferentes variables medidas. ....	25
Figura No.	
1 Croquis del diseño experimental año 2 .....	14
2 Croquis del diseño experimental año 3 .....	14
3 Precipitación y temperatura para el período durante el cual se desarrolló el cultivo en relación al promedio histórico nacional.....	17
4 Rendimiento de trigo en función de agregado de nitrógeno y tratamiento .....	22
1 Componentes limitantes del rendimiento en función del nitrógeno agregado.....	29

## 1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, explicado por un alza en el precio de los granos, el rubro agrícola se ha expandido hacia nuevas zonas, siendo dominado por un sistema de siembra directa y agricultura continua.

La eliminación de las praderas de las rotaciones, así como también la dominancia de una secuencia de cultivo trigo-soja, han llevado a que se generen condiciones físicas restrictivas, provocando la degradación de la estructura del suelo, siendo la compactación sub-superficial uno de los factores físicos más limitantes en el sistema agrícola Uruguayo. Esto ha provocado un incremento de la impedancia mecánica del suelo para el desarrollo de raíces de los cultivos, reducido la capacidad de utilización del agua almacenada en capas profundas del suelo y disminuido la disponibilidad de nutrientes para la planta. Se estima que la compactación es un problema generalizado en la región, de gran importancia para la agricultura, debido a su alta persistencia. En la actualidad esto podría estar limitando los rendimientos en buena parte de los sistemas agrícolas en el país.

El uso del laboreo sub superficial surgió como una posible solución para esta problemática, ya que puede soltar el suelo, reduciendo la resistencia a la penetración, favoreciendo el desarrollo radicular, así como también aumentar la disponibilidad de agua y de nutrientes para los cultivos sin generar grandes distorsiones en la superficie, conservando el suelo cubierto y de esta manera poder mantener un esquema de siembra directa.

El problema con este método es que es una práctica muy costosa de implementar, por lo que es necesario estudiar cuál es su efecto sobre el cultivo y los diferentes factores que componen el rendimiento, su efecto sobre el suelo, y durante cuánto tiempo pueden ser apreciados los efectos de esta labor.

### 1.1. OBJETIVOS

Analizar cuál es el efecto de la descompactación subsuperficial sobre el cultivo de trigo y que residualidad tiene.

Evaluar si la descompactación tiene efecto en la respuesta al nitrógeno.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

La compactación del suelo ocurre cuando las partículas del suelo son presionadas entre sí, reduciendo el espacio poroso entre ellas. Al aumentar la compactación del suelo, se reduce el número de macro poros, la infiltración y el drenaje de agua (DeJong-Hughes et al., 2001).

Es un proceso de degradación estructural del suelo, que se encuentra prácticamente en todos los sistemas agrícolas del mundo (Soane y van Ouwerkerk, 1994), reconocida como la consolidación física del suelo por una fuerza aplicada, capaz de destruir los agregados (Wolkowski y Lowery, 2008). Puede ocurrir naturalmente al asentarse el suelo o puede ser inducido por la labranza, el tráfico de maquinaria, pisoteo de animales y fuego (Kozłowski, 1999). Tiene el potencial de alterar dramáticamente la morfología y fisiología de la planta (Bingham 2001, Passioura 2002), y de reducir el crecimiento y rendimiento del cultivo.

### 2.1. CAUSAS DE LA COMPACTACIÓN

Según Arvidsson y Håkansson (1996) el incremento en la densidad aparente y la profundidad afectada dependen de factores como la textura del suelo, el contenido de humedad, la presión de contacto, el peso de los ejes, la velocidad del vehículo y el número de pasadas.

DeJong-Hughes et al. (2001) definen que hay diferentes fuerzas, tanto naturales como inducidas por el hombre que inducen la compactación del suelo. Estas pueden provenir de algo tan grande como un tractor, cosechadora u otro tipo de maquinaria o de algo tan pequeñas como como una gota de lluvia. También dividen la compactación en diferentes tipos dependiendo de la profundidad a la cual ocurren y explican cuáles son los factores que las provocan.

- El impacto de la lluvia es una causa natural de la compactación, formando como una costra del suelo, generalmente menor a 1,3 centímetros de espesor en la superficie del suelo, que pueden afectar la emergencia de plántulas. El pasaje de un arado superficial a menudo puede aliviar este problema.
- Un uso repetido de arado de vertedera o disquera a la misma profundidad puede generar en algunos suelos una suela de arado, justo debajo de la profundidad de la labranza. Esta capa en general es relativamente delgada (entre 2 y 5 centímetros de espesor), que puede no tener un efecto significativo en la producción de cultivos, y puede ser aliviado mediante la variación de la profundidad de la

labranza en el tiempo o por las operaciones especiales de labranza. La labranza agresiva también aumenta la susceptibilidad de un suelo a la compactación porque reduce la estabilidad de los agregados (Wolkowski y Lowery, 2008). En general suelos sin una buena estructura, con partículas individuales, son más susceptibles a presiones externas que generan compactación (DeJong-Hughes, s.f.).

- El tráfico de ruedas es sin duda la principal causa de la compactación del suelo. Con el aumento de tamaño de las explotaciones, la ventana de tiempo para conseguir que todas las operaciones necesarias sean realizadas en forma oportuna es a menudo limitada, lo que ha generado un aumento en el tamaño y peso de la maquinaria utilizada, agravando así la compactación que estas generan. Botta et al. (2016) mencionan que en contraste con la compactación superficial, ésta persiste por más tiempo, y puede causar reducciones permanentes en los rendimientos de los cultivos.
- Una rotación con bajo número de cultivos diferentes afecta negativamente la estabilidad de los agregados del suelo, aumentando la susceptibilidad a la compactación, debido a los limitados sistemas de enraizamiento producidos (DeJong-Hughes et al., 2001). Vale la pena mencionar, que en Uruguay esta situación ha sido agravada, debido a la sustitución de rotaciones con praderas por agricultura continua, dominada por el cultivo de soja.

Por otro lado en los sistemas tradicionales de producción basados en el laboreo, los problemas de compactación sub-superficial son en cierta forma disimulados, al menos durante breves períodos de tiempo (Martino, 2001). Sin embargo Hernández et al., citados por Gutiérrez et al. (2014) afirman que la mayor aireación producto de la labranza convencional, se pierde rápidamente cuando el suelo se humedece, dado que es menor el porcentaje de macroporos estables que quedan a diferencia de un suelo en siembra directa.

Por otro lado las principales características intrínsecas del suelo vinculadas a la susceptibilidad de compactación son, el contenido de humedad, el contenido de materia orgánica y la textura del suelo. Al aumentar el contenido de humedad del suelo aumenta la susceptibilidad de este a ser compactado (Bakker y Davis, Lipiec et al., citados por Hamza y Anderson 2005, Wolkowski y Lowery 2008). Los suelos con bajo contenido de materia orgánica tienden a ser más susceptibles a la compactación al no formar agregados fuertes (Wolkowski y Lowery 2008, Gutiérrez et al, 2014), como así también los suelos de texturas finas tienden a ser más susceptibles (Harris 1971, Håkansson et al. 1987), donde además la persistencia del daño realizado suele ser mayor (Botta et al., citados por Gutiérrez et al., 2014).

Martino (2001) sostiene que para muchos sistemas productivos en Uruguay, los cuales cuenten con historias de más de una década de agricultura sin rotación con pasturas y sin laboreo, pueden estar limitados por la ocurrencia de restricciones físicas del suelo

asociadas a procesos degradativos. Principalmente limitados por la compactación sub-superficial del suelo, producto del frecuente tráfico de maquinaria, conjunto a otros factores como la presencia de suelos de texturas medias a pesadas, con baja capacidad de infiltración de agua y el clima húmedo. Sawchik (2007), también concluye que esta combinación de factores que caracteriza a la agricultura en el Uruguay, determina un alto riesgo de ocurrencia de estos problemas en el país.

Según Martino (2001), el grado de empaquetamiento o compactación de las partículas de un suelo determina su capacidad para permitir el desarrollo de cultivos, su capacidad para soportar el tráfico y su susceptibilidad a la erosión, entre otros factores. Un suelo muy suelto puede suministrar un ambiente favorable para el desarrollo de las plantas, pero puede ser muy susceptible a la erosión y no permitir el tráfico de máquinas. En el otro extremo, suelos con alto grado de compactación pueden soportar el tráfico en un amplio rango de contenidos de humedad, pero imponen importantes restricciones para el crecimiento de cultivos.

## 2.2. EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN

### 2.2.1. Efecto en el suelo

La pérdida de espacio poroso entre agregados en el suelo causada por la compactación, afecta ciertas propiedades del suelo como la densidad aparente, la resistencia a la penetración, la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenaje de agua disponible para las planta (Sadras et al., 2005). También afecta aquellas propiedades asociadas al intercambio gaseoso y la aireación (difusión de oxígeno), el movimiento del calor y la actividad biológica (Allmaras et al., 1994). En la siguiente etapa se produce una trituración de agregados individuales (espacio poroso intra-agregado) a medida que el volumen del suelo se reduce más, aumentando así la densidad aparente (Allmaras et al., 1994).

Ya se ha demostrado que la compactación se puede ver como un aumento de la densidad aparente del suelo (Soane et al. 1981, Allmaras et al. 1994, da Silva et al. 1997, Ishaq et al. 2001c, Sadras et al. 2005, Botta et al. 2006, Singh et al. 2015), o sea que disminuye el volumen del suelo mediante la compresión de sus partículas (Chaudhary et al., citados por Singh et al., 2015). da Silva et al. (1997), afirman que la densidad aparente es afectada fuertemente por la textura del suelo, el contenido de materia orgánica y el tráfico de maquinaria, siendo este último el factor más determinante en el aumento de la densidad aparente del suelo.

Singh et al. (2015) concluyen que la conductividad hidráulica está directamente correlacionada con la macro-porosidad, y que la micro-porosidad se incrementa a expensa de la macro-porosidad al compactarse el suelo. Esto resulta que, un suelo compactado

tenga frecuentemente mayor espacio interno cubierto con agua, quedando así menor espacio interno cubierto por aire (Ishaq et al., 2001). Por ende, el suministro de oxígeno a las raíces también se ve afectado negativamente por la compactación, dado que éste depende de la existencia de un sistema continuo de poros ocupados por aire, siendo el contenido de humedad y el tamaño y distribución de poros propiedades de los suelos que afectan directamente la aireación de las raíces (Martino, 2001).

La tasa de infiltración se ve afectada ya que la compactación afecta la estructura edáfica de la capa compactada, afectando su capacidad de drenaje que es lo que determina la velocidad de infiltración de todo el perfil (DeJong-Hughes et al., 2001)

Al reducirse la tasa de infiltración se genera un aumento en las pérdidas de agua por escurrimiento, aumentando el riesgo de erosión hídrica del suelo o en caso contrario el suelo permanece inundado durante más tiempo siendo éste otro aspecto negativo de la compactación (Jorajuría y Draghi 1997, Gutiérrez et al. 2014). Además, la reducción de la tasa de infiltración aumenta las pérdidas por escurrimiento, disminuyendo así el ingreso de agua al suelo y por ende reduciendo también la reserva disponible para los cultivos (Gil et al., Bacigalupo y Gerster, citados por Gutiérrez et al., 2014).

Motavalli et al. (2003) encontraron que dependiendo el régimen hídrico del año, estarían determinadas las limitantes que genere la compactación. En años secos se convierte en un grave problema restringido el crecimiento de la raíz, pudiendo conducir al aumento de estrés hídrico. En años húmedos, la compactación del suelo disminuye la disponibilidad de N debido al aumento de las tasas de desnitrificación y escorrentía. Ambas situaciones llevarían a disminución en el rendimiento.

La compactación limita la profundidad que alcanza el sistema radicular por lo cual la disponibilidad hídrica desciende conforme se acorta ésta (Ishaq et al., 2001). Por otro lado, dicho proceso también tiene influencia negativa sobre la estructura del suelo (Martino, 2001), generando aumentos del punto de marchitez permanente, y disminuciones en el contenido de agua a saturación, por ende la compactación genera reducciones en la capacidad de almacenaje de agua disponible para las plantas (Liebing et al., citados por Gutiérrez et al., 2014)

La compactación en el suelo reduce el “rango de agua menos limitante” (LLWR por sus siglas en inglés “least limiting water range”) descrito por Letey, citado por Martino (2001). Este rango define la capacidad de agua disponible como la cantidad de agua retenida entre dos límites. El límite superior es la máxima cantidad que puede retener un suelo sin que el oxígeno sea limitante para el crecimiento de las raíces (menos de 10 % del volumen del suelo ocupado por aire, Grable, citado por Martino, 2001), en caso de que este valor fuera inferior al correspondiente a capacidad de campo. El límite inferior es el contenido de humedad al cual la resistencia a la penetración por parte del suelo reduce el

crecimiento radicular, en aquellas situaciones en que este valor resulte superior al correspondiente a marchitez permanente.

### 2.2.2. Efecto en plantas

Una reducción en crecimiento radicular en plantas que crecen en suelos compactados ha sido relacionada con reducción en la conductancia estomática, y reducción en tasas de división y expansión celular. La disponibilidad reducida de recursos del suelo contribuye además a un reducido crecimiento de brotes (Sadras et al., 2005). El mismo autor también observó que la compactación del suelo aumenta la resistencia a la penetración, lo que genera que las raíces deban ejercer mayor fuerza para penetrar en la capa compactada.

La morfología de un sistema de raíces responde tan fácilmente a su entorno que es mínima la fuerza necesaria que se debe aplicar a un suelo suelto y bien estructurado, para que ésta sea alterada (Taylor y Brar, 1991). Se ha observado que las raíces que han estado creciendo en suelos de elevadas resistencias mecánicas, tienden a tener diámetros mayores (Materechera et al., citados por Whalley et al., 1995), a contorsionarse (Kirkegaard et al., citados por Martino, 2001) y por momentos a crecer horizontalmente (Dexter, 1988).

Esto se demostró muy claramente en el estudio de Whalley et al. (1995) sobre maíz, donde encontraron que en dos suelos de resistencia mecánica contrastantes, la biomasa total de las raíces no se diferenció, pero el suelo no compactado tuvo una mayor proporción de las raíces en profundidad.

La magnitud de este proceso varía con la especie, dado que existe cierta variabilidad inter-específica en la tolerancia de resistencia a la penetración, la cual se relaciona con el diámetro de las raíces y su interacción con la geometría de los poros del suelo. Los sistemas radiculares fibrosos como las de las gramíneas, dado su reducido diámetro, serían más aptos para desarrollarse en suelos con alta resistencia a la penetración a diferencia de los sistemas radiculares con raíces pivotantes (Martino, 2001), como las raíces de las plantas dicotiledóneas de cultivos anuales (por ejemplo, la soja), las cuales son las más sensibles a las condiciones del suelo, especialmente a la compactación (Arvidsson y Håkansson, citados por Botta et al., 2016).

Esta reducción en crecimiento radicular reduce la absorción y eficiencia del uso de los nutrientes por parte de la planta (Ishaq et al., 2001).

Motavalli et al. (2003) citan algunos estudios que han documentado incrementos en la desnitrificación o en la producción de  $N_2O$  en suelos compactados, lo que sería una mayor pérdida de este nutriente como efecto de la compactación. Señalan además un

posible aumento de las pérdidas de N como resultado de la mayor escorrentía superficial en suelos compactados, debido a una menor infiltración de agua.

Martino (1997) indica que el factor más limitante en el sistema de siembra directa en cultivos de invierno es la deficiencia de oxígeno en las primeras etapas de desarrollo del cultivo, resultando en una menor tasa de emergencia y escasa profundidad de raíces.

Ishaq et al. (2001) encontraron diferencias en la absorción de nutrientes como consecuencia de la compactación, donde los cultivos de trigo (*Triticum aestivum* L.) tuvieron reducciones de absorción de N, P y K en torno a 12-35 %, 17-27 % y hasta 24 % respectivamente, en aquellos suelos previamente compactados.

Si bien esto indicaría que un suelo al compactarse es menos productivo que su estado original, la relación entre la compactación del suelo y los rendimientos no siempre es directa, debido a que interactúan una serie de factores, como el tipo de suelo, y el contenido de agua, aire y nutrientes en el suelo en forma conjunta en los diferentes estadios de crecimiento de la planta y diferentes niveles de compactación (Gil et al., citados por Gutiérrez et al., 2014).

Lowery y Schuler, citados por Ishaq et al. (2001), encontraron que en maíz la absorción de N y K se ve decrecida en los suelos compactados, mientras que el Fe y Mn incrementaron conforme incrementaba la compactación. También encontraron que el contenido de N, P y K en hoja, no se diferenció entre el tratamiento compactado y el testigo, en comparación con Bennie y Krynauw, citados por Díaz Zorita (2000) quienes sí describieron reducciones en las concentraciones de nutrientes foliares, lo cual afectó a los rendimientos de los cultivos en suelos compactados.

Un cambio en la apariencia del sistema radicular no necesariamente causa una alteración en el crecimiento o rendimiento de la planta o cultivo sobre el suelo, ya que un sistema radicular reducido como consecuencia de la compactación puede aun así suministrar toda el agua y los nutrientes necesarios para la planta (Taylor y Bar, 1991).

Suelos ligeramente compactados pueden acelerar el proceso de germinación de las semillas, debido a que promueven un buen contacto entre la semilla y el suelo. Además, una compactación moderada puede reducir pérdida de agua del suelo por evaporación (DeJong-Hughes et al., 2001).

### 2.3. FORMAS DE REMEDIAR LA COMPACTACIÓN

Entre las diversas opciones para remediar la compactación del subsuelo se encuentran como las más utilizadas y efectivas la labranza profunda y la selección de rotaciones de cultivos con plantas de raíces profundas capaces de desarrollar sus raíces en

suelos con altos niveles de compactación (“laboreo biológico”) (Dexter 1991, Martino 2001, Motavalli et al. 2003, Sawchik 2007).

El uso de paraplow previo a la siembra de los cultivos ha aliviado parcialmente las restricciones físicas, resultando en mejores implantaciones de los cultivos, mayor volumen de suelo explorado por las raíces, y mayor productividad (Hipps y Hodgson, 1988).

Se ha demostrado que la labranza profunda con paraplow puede reducir efectivamente la impedancia mecánica del suelo bajo sistemas de siembra directa (Martino 1998, Díaz Zorita 2000, Gutiérrez et al. 2014). Esto genera un aumento de la exploración radicular lo que permitiría aumentar la captura de los recursos, y con ellos aumentar el crecimiento y el rendimiento de los cultivos (Díaz Zorita 2000, Ishaq et al., 2001, Sadras et al., 2005).

Según Cholaky y Cisnero (2007) la inclusión de operaciones de labranza profunda que fragmentan las capas endurecidas con el mínimo enterrado de la cobertura superficial, son una alternativa adecuada de manejo, ya que disminuyen significativamente la resistencia mecánica y la densidad aparente e incrementan la velocidad de infiltración.

Martino (1998) observó que el paraplow generó un aumento en la porosidad, el cual se debe casi exclusivamente al incremento de los macroporos, al igual que el estudio de Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001) en el cual se reportó un incremento de 7,8 a 13,3 % en el volumen de poros mayores a 60  $\mu\text{m}$  en un suelo franco arenoso-arcilloso, lo que generó un aumento en la capacidad de infiltración de agua y un incremento en el flujo de oxígeno dentro del subsuelo.

Los estudios indican que el mayor efecto que produce el paraplow en las propiedades físicas del suelo, se da generalmente entre los primeros 15 y 40 cm de profundidad (Braum et al. 1984, Martino 1998). En concordancia con esto, Sadras et al. (2005) observaron que en los primeros 10 cm de profundidad del perfil del suelo no se vieron diferencias significativas entre los tratamientos.

Para perfiles de humedad del suelo medidos en 2002, el límite superior de retención de agua del suelo no era afectado por los tratamientos, mientras que sí reducían el límite inferior de agua disponible en la mitad inferior del perfil, lo que aumenta la disponibilidad total de agua en el tratamiento con subsolado. No solo se produce un incremento de la captura de agua por aumento de la tasa de infiltración, sino que además aumenta la capacidad de retener agua del suelo, lo que reduce las pérdidas improductivas y permite aumentar la eficiencia del uso del agua (Sadras et al., 2005).

Motavalli et al. (2003) encontraron respuesta significativa en la absorción de N por los cultivos, siendo mayor la absorción en los tratamientos descompactados. Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001) quienes también comprobaron este efecto, lo asocian a una mayor mineralización de la materia orgánica producto de la mejora de la aireación del suelo y la infiltración de agua en el mismo.

Motavalli et al. (2003) observaron en un experimento con maíz (*Zea mays* L.), llevado a cabo en un suelo franco arenoso del sureste de Missouri, el laboreo de subsuelo a una profundidad de 30 cm tuvo múltiples efectos, incluida la superación de una barrera natural o provocada por el laboreo e incrementos en el contenido de agua volumétrica y el consumo de N, especialmente para cultivos en el año 2001, con precipitaciones bajas a principio de temporada. También observó que la eficiencia de recuperación del N (NRE) fue significativamente mayor en el tratamiento con subsolador. El rendimiento en grano de maíz en promedio, fue superior en suelos descompactados que en los tratamientos compactados. Los resultados de este estudio sugieren que la labranza profunda es una herramienta de gestión que puede superar las restricciones de N y la disponibilidad de agua del suelo generada por la compactación del subsuelo en suelos de textura arenosa.

Sadras (2005) comparando tratamientos compactados con suelos tratados mediante laboreo del subsuelo, observó que los cultivos control de trigo produjeron entre 1,2 y 2,9 tt/ha, y la mejora de rendimiento atribuible a la mitigación de la compactación del suelo varió de 0 a 43% en la colina y 20% en la pendiente.

Para cultivos de verano Martino (2001) cuantificó incrementos de más de 40% en el rendimiento de maíz y girasol con siembra directa luego de un laboreo sub-superficial con paraplow. Las variaciones en el rendimiento estuvieron asociadas a la mejora en implantación, en crecimiento del cultivo y en rendimiento individual de las plantas.

Se ha demostrado un incremento en la absorción de P y K como efecto del paraplow, lo cual se atribuyó a una mayor exploración del suelo por las raíces (Ide et al., citados por Martino, 2001). Por otro lado, Barbosa et al. (1989) en un estudio de los efectos del paraplow sobre el cultivo de soja (*Glycine max* L.), indicaron una mayor disponibilidad de Ca, Mg y K en el tratamiento de laboreo profundo, como consecuencia de un mayor acceso de las raíces sobre los nutrientes del subsuelo. Esto se caracterizó como una de las causas del aumento del crecimiento y rendimiento, encontradas en los tratamientos con labranza profunda.

El efecto provocado por la descompactación mecánica del suelo, en sus propiedades físicas y en los cultivos, tiene una determinada duración, la cual depende principalmente de cuán degradado esté el suelo con el que se inicia (Dexter, citado por Martino, 2001). Martino (1998), encontró que fueron necesarios 25 meses para que las propiedades físicas del suelo volviesen al estado inicial luego de haber pasado el paraplow.

Botta et al. (2010), indican una residualidad de dos años post subsolado, al igual que en el estudio de Botta et al. (2006a) donde el incremento de la resistencia a la penetración se da en gran parte durante el primer cultivo y entre los 30 y 60 cm de profundidad.

Los incrementos generados por el subsolado practicado previo a cada cultivo comparado con una pasada cada tres cultivos, fueron muy reducidos como para igualar el costo energético extra (Martino, 1998). Sadras et al. (2005) observaron que la respuesta de rendimiento al subsolado permaneció por lo menos durante dos temporadas de cultivo, mientras que Álvarez et al. (2009) no detectaron efectos residuales de la descompactación sobre los rendimientos de los cultivos de soja (tanto en cultivos de primera como de segunda), un año después de haber subsolado.

La labranza por sí sola no puede remediar estados de degradación estructural severos, ya que ésta solo afecta directamente la macro-estructura del suelo. Sin embargo, la labranza puede ser el primer paso en la mejora del suelo, dado que proporciona espacios de poros llenos de aire en éste, donde puede desarrollarse la actividad biológica (Dexter, 1988).

Según Wolkowski (2000) para estudios realizados en Arlington durante los años 1997 y 1998 (maíz y soja), Ripon (1996), Columbus (1996, 1997, 1998) no se vieron respuesta en rendimiento para tratamientos de laboreo incluyendo el subsolado. En cambio el mismo autor en estudios realizados próximos al condado de Monitowoc sobre el efecto del subsolado en rotaciones de maíz/soja observó que aumentó significativamente el rendimiento en 1997 y 1998, pero para 1999 el rendimiento de soja no se vio afectado.

Martino (1998) afirma que el subsolado del suelo no resultó siempre en una mejora del rendimiento, ya que no se registró respuesta a la descompactación sub-superficial en 3 de los 14 experimentos que integraron este trabajo.

Evans et al. (1996) afirman que el subsolado del suelo no necesariamente incrementa los rendimientos, particularmente si la compactación no es evidente. De acuerdo a esto Martino (2001), Gutiérrez et al. (2014), señalan la necesidad de identificar zonas donde la compactación sea realmente una limitante para minimizar costos e incrementar la eficiencia de la labor.

Es de importancia considerar que el subsolado es una labor de alto costo y que sólo se recomienda realizar cuando las características del suelo lo justifiquen (Gutiérrez et al., citados por Gutiérrez et al., 2014), no siendo conveniente su uso anual pero sí es posible seleccionar momentos estratégicos dentro de una rotación de cultivos, tales como al final de un período de pastoreos, o previo a la siembra de un cultivo de verano (Martino, 1997).

Otra alternativa para remediar la compactación del suelo, sin dejar de lado la siembra directa, es la selección de rotaciones que incluyan cultivos con plantas de raíces profundas capaces de desarrollar sus raíces en suelos con altos niveles de compactación (Martino 2001, Motavalli et al. 2003, Sawchik 2007). Al morir y descomponerse estas raíces, se forman bio-canales en el suelo, los cuales proporcionan espacio para el enraizamiento profundo de los cultivos siguientes (Dexter, 1991). Esto es lo que se conoce como “laboreo biológico”.

El “laboreo biológico” mejora la estructura del suelo por medios tales como la acción de raíces de las plantas, lombrices de tierra y otros organismos del suelo. Las raíces de las plantas pueden mejorar el suelo por agregados vinculados físicamente y estabilizadores, compuestos de exudado que unen agregados, y canales en el suelo (Dexter, 1991). Estos canales, denominados bioporos, permanecen después de descomponerse las raíces y puede servir como caminos de baja resistencia para seguir el crecimiento de la raíz o el movimiento del agua. Estos poros también pueden resistirse a cerrar bajo esfuerzos de compactación, especialmente si están orientados verticalmente (Blackwell et al., 1990).

Un ejemplo de esto sería la intensificación de la agricultura introduciendo cultivos de cobertura en la rotación, cuando en éstas existen largos períodos de barbecho (Restovich et al., citados por Tours et al., 2014). La introducción de cultivos de cobertura invernales en la secuencia puede provocar disminuciones en la densidad aparente del suelo y aumentar considerablemente la porosidad total gracias a la exploración radicular (Villamil et al., citados por Tours et al., 2014).

Cultivos forrajeros perennes, debido a sus extensas biomásas de raíces y continuidad de sus sistemas durante varios años, tienen un gran potencial para crear una red de bioporos y realizar la labranza biológica (Gentile, 2002).

La eficacia del método biológico también depende del estado inicial de la compactación del suelo, incluso las especies indicadas para esta finalidad tienen limitado el desarrollo de sus raíces cuando el suelo presenta niveles muy altos de densidad y resistencia a la penetración (Cubilla et al., 2002).

#### 2.4. HIPÓTESIS

I) El laboreo sub-superficial tendrá un efecto residual positivo sobre el desarrollo del cultivo lo que provocará un aumento en rendimiento.

II) El laboreo sub-superficial provocará un aumento en la mineralización lo que generará una mayor disponibilidad de nitrógeno para la planta.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. LOCALIZACIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

El predio experimental corresponde a la región Oeste de la República Oriental del Uruguay, en el departamento de Soriano.

El material geológico predominante corresponde a sedimentos limosos con mucha influencia de la formación Fray Bentos, la cual generalmente la recubren en delgados espesores. El relieve es suavemente ondulado, con una pendiente de 1 a 3%. Los suelos predominantes son Brunosoles Éútricos Típicos y también pueden encontrarse Vertisoles Háplicos (MGAP. DSA. DIRENARE, 2006).

#### 3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y TRATAMIENTOS

Se utilizó un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones anidado por año de realizada la tareas de descompactación sub-superficial. Los tratamientos de manejo del suelo corresponden a siembra directa (SD) y descompactado subsuperficial (D). La descompactación se realizó en el otoño 2015 y otoño 2016 por lo que se generó una combinación de manejo del suelo compuesta por SD2015 y D2015 contra SD2016 y D2016. Dentro de cada fecha de descompactación se evaluaron ocho tratamientos de fertilización. La respuesta en trigo corresponde al cultivo sembrado en el invierno 2017 (figura 2). Los tratamientos de fertilización se aplicaron sobre parcelas de 5 m de ancho por 5 m de largo, las cuales fueron organizadas de manera de ubicar 8 tratamientos dentro de terreno laboreado sub-superficialmente y 8 tratamientos dentro de terrenos sin laborear. El área total del ensayo es de 0.16 hectáreas.

Cuadro No. 1. Planificación de los tratamientos

	Siembra	Z22	Z30	Z33	Z65	TOTAL
Tratamiento 1	0 N, 0 K	0	0	0	0	0
Tratamiento 2	0 N, 60 K	0	0	0	0	0
Tratamiento 3	40 N 60K	según análisis				?
Tratamiento 4	40 N 60K	0	0	0	0	40
Tratamiento 5	40 N 60K	40	0	0	0	80
Tratamiento 6	40 N 60K	40	40	0	0	120
Tratamiento 7	40 N 60K	40	40	40		160
Tratamiento 8	40 N 60K	40	40	40	40	200

Cuadro No. 2 Tratamientos finales.

	Siembra	Z22	Z30	Z65	Total
Sin fertilizar	0 N, 0 K	0 N	0 N	0 N	0 N
Potasio	0 N, 60 K	0 N	0 N	0 N	0 N
Siembra	40 N, 40 K	0 N	0 N	0 N	40 N
Siembra	40 N, 40 K	0 N	0 N	0 N	40 N
Siembra+Z22	40 N, 40 K	40 N	0 N	0 N	80 N
Siembra+Z22+Z30	40 N, 40 K	40 N	40 N	0 N	120 N
Siembra+Z22+Z30+Z65	40 N, 40 K	40 N	40 N	40 N	160 N
Siembra+Z22+Z30+Z65	40 N, 40 K	40 N	40 N	40 N	160 N

En un principio se planificó hacer 8 tratamientos, dentro de los cuales se incluían fertilizaciones a Z33 y un tratamiento fertilizado según análisis de laboratorio y siguiendo el modelo de fertilización actualmente utilizado en Uruguay a siembra, Z22 y Z30 (Tratamiento 3). Este último tratamiento no se pudo realizar debido a que los resultados de laboratorio llegaron después de haberse finalizado el ensayo, quedando igual al tratamiento 4.

Debido a condiciones climáticas adversas en la fecha (exceso de lluvias) no se pudieron realizar las fertilizaciones a Z33, por lo tanto los tratamientos 7 y 8 quedaron iguales.

A todos los tratamientos excepto por uno se le agregó potasio a la siembra, para cerciorarse que este no fuera una limitante y una posible deficiencia de este nutriente no tuviera interferencia en los resultados obtenidos.

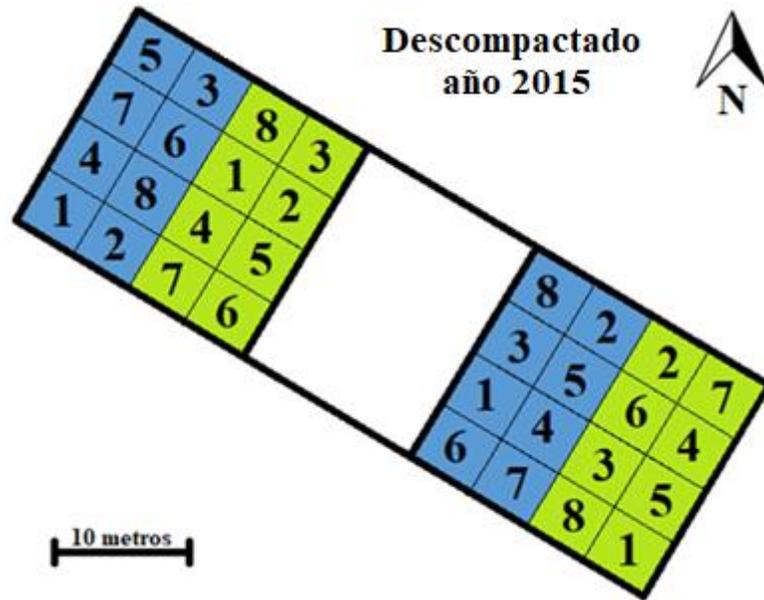
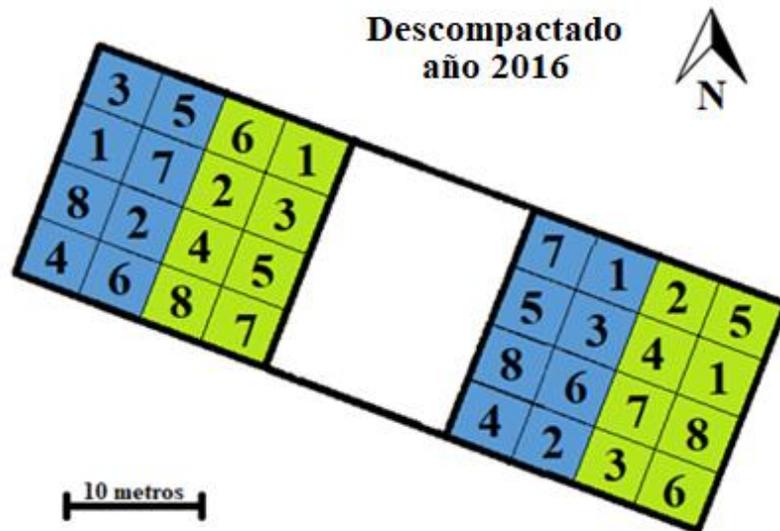


Figura No. 2 Croquis del diseño experimental año 2



Referencias:

- Siembra directa
- Descompactado

Figura No. 3 Croquis del diseño experimental año 3

### 3.3. MANEJO DEL CULTIVO

El sistema está basado en varios años con agricultura continua bajo siembra directa. El laboreo sub-superficial fue aplicado durante el 2015 y 2016, para los tratamientos año 2 y año 3 respectivamente.

### 3.4. DETERMINACIONES REALIZADAS

#### 3.4.1. A nivel del suelo

Para la concentración de N-NO<sub>3</sub> del suelo se realizaron dos muestreos, uno a siembra y otro cuando el cultivo se encontraba en Z22. En ambos casos con un calador se tomaron muestras del perfil de 20 centímetros de profundidad.

Las muestras a la siembra se realizaron el 22 de julio, previo a la siembra y fertilización de las parcelas correspondientes, en puntos con y sin laboreo sub-superficial, en los tratamientos de 2 y 3 años y sus respectivas repeticiones.

Las muestras en Z22 se tomaron el 2 de septiembre. Se realizaron 5 pinchazos por parcela distribuidos una en cada esquina y una en el medio para tener una muestra representativa de la misma. Esto se realizó en todas las parcelas ya que había diferencias entre tratamientos debido a diferentes niveles de nitrógeno aplicado.

Contenido de humedad del suelo. El 11 de noviembre, cuando el cultivo se encontraba en Z45 se realizó un muestreo en profundidad, haciendo un pozo por parcela, dividiendo las muestras cada 20 centímetros, en los tratamientos de mayor contenido de nitrógeno y en los testigos.

#### 3.4.2. A nivel de planta

El 2 de septiembre se realizó conteo de plantas. Se contaron plantas en 9 metros lineales elegidos al azar en todas las parcelas, para obtener un promedio de plantas por metro lineal lo más acertado posibles, y de esta forma poder calcular el porcentaje de implantación.

El 25 de septiembre con el cultivo en Z30 se tomaron muestras de plantas para analizar contenido de nitrógeno foliar. Se tomaron 10 plantas en Z30 por parcela de manera aleatoria, se les cortó la raíz y se secaron en estufa a 40 grados. Una vez que las muestras estaban secas se molieron para poder realizar el contenido de nitrógeno.

El 21 de octubre, con el cultivo en Z45, se tomaron muestras de plantas para analizar el contenido de nitrógeno a espigazón. Se repitió el mismo proceso de muestreo y análisis realizado a Z30.

El jueves 21 de diciembre se realizó la cosecha. Se utilizó una maquina especializada para cosechar micro parcelas. Se cosecharon las "cabeceras" de cada parcela para poder determinar los límites de cada tratamiento de manera más precisa, y se cosechó un área de entre 3 y 3.5 metros de largo por el 1.25 metros.

Se pesó el grano cosechado luego de una preligiera, para obtener el rendimiento de cada tratamiento, se midió el peso hectolitrito y se hizo el peso de 1000 granos pesando 2000 granos por parcela para obtener un mejor resultado.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL AÑO

Para el período julio-diciembre 2017, se tomaron datos pluviométricos mensuales de la región de Mercedes y alrededores, y también la media histórica mensual de los años 1980-2009 para estos meses. Esto se obtuvo de la información brindada por INIA GRAS. Por otro lado se obtuvo también la información pluviométrica diaria de ese período, recolectada de la información brindada por Seccional Policial 3ra. de Mercedes. Con esto se construyó un régimen de precipitaciones decádico para el análisis posterior.

Por otro lado, se recolectaron los datos térmicos, los cuales también se obtuvieron de la información brindada por la Unidad de Agroclima y Sistemas de Información de INIA. Tanto para la media mensual de ese período como para la media promedio de esos meses en el período 1980-2009, se utilizaron los datos registrados por la estación meteorológica de INIA La Estanzuela, al ser ésta la más cercana al sitio experimental.

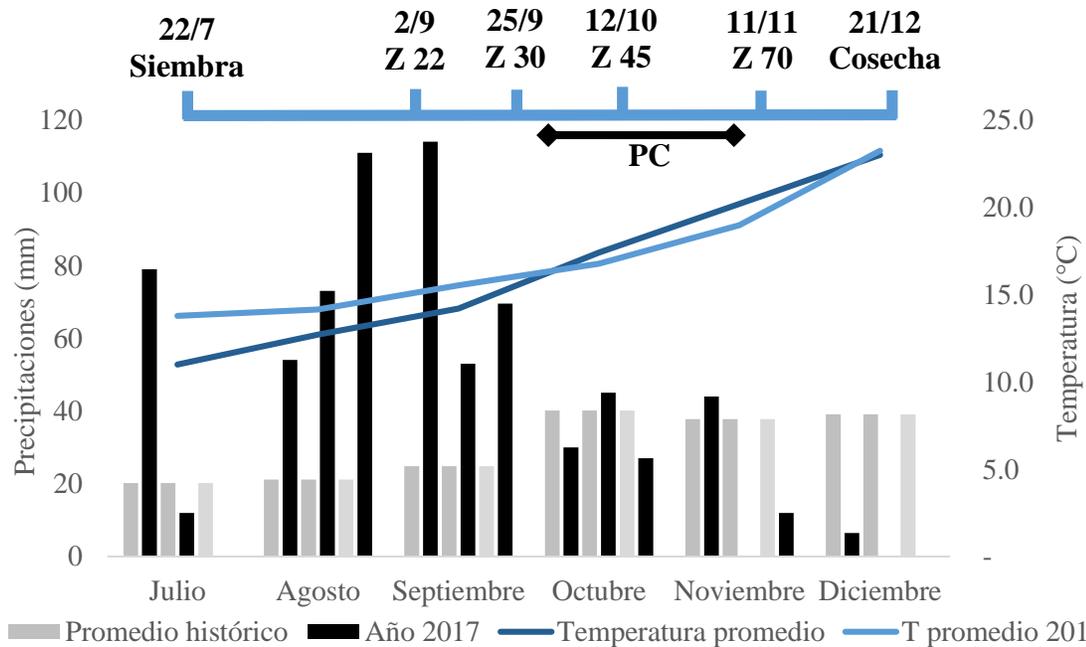


Figura No. 4 Temperatura y precipitaciones en el período julio-diciembre 2017, medias históricas térmicas e hídricas del período 1980 – 2009 para la zona de Mercedes y alrededores, y ubicación temporal de las etapas fenológicas del cultivo.

Las precipitaciones para los primeros meses del cultivo fueron enormemente superiores al promedio histórico para la ciudad de Mercedes, siendo mayor la diferencia para los meses de agosto y septiembre (275,4% y 215% por encima del promedio respectivamente). Dichos excesos hídricos generaron dificultades en la implantación y el desarrollo del cultivo hasta inicios de Z30, etapa fundamental en la cual se determina el número máximo de macollos. El mes de octubre se caracterizó por presentar precipitaciones por debajo de lo normal (15% menos que el promedio histórico). Esto pudo haber afectado el rendimiento, ya que se dio mientras el cultivo comenzaba el encañado, etapa de mayor crecimiento y demanda del cultivo. Fue donde se ubicó la mayor parte del período crítico. Después de la primera decena de noviembre, las lluvias fueron casi nulas, lo que también pudo haber afectado significativamente el rendimiento, ya que en este momento estaba terminando la antesis y comenzando el llenado de grano.

También vale la pena mencionar que las temperaturas promedio hasta Z30 fueron superiores al promedio histórico, lo que pudo haber acelerado la tasa de desarrollo, acortando el ciclo reduciendo así el rendimiento.

## 4.2. RESULTADOS

### 4.2.1. Aporte de nitrógeno desde el suelo y estado nutricional del cultivo

Cuadro No. 3 Interacción entre sitio y laboreo y su efecto en la concentración de N-NO<sub>3</sub> en suelo y %N en planta.

	D2015	SD2015	D2016	SD2016
N siembra (ppm)	23 b	25 a	16 c	17 c
N Z22 (ppm)	4 a	4 a	4 a	4 a
N Z30 (% planta)	2,5 a	2,7 a	2,8 a	2,8 a
N Z45 (% planta)	1,6 ab	1,7 a	1,5 b	1,6 ab

Referencias: D.= descompactado; SD= sin descompactar.

Cuadro No. 4 Efecto de año y laboreo sobre la concentración de N-NO<sub>3</sub> en suelo y %N en planta.

	2015	2016	S. D.	Desc.
N siembra (ppm)	24 a	16 a	21 a	20 b
N Z22 (ppm)	4 a	4 a	4 a	4 a
N Z30 (% planta)	2,6 a	2,8 a	2,7 a	2,6 a
N Z45 (% planta)	1,6 a	1,5 a	1,6 a	1,5 a

Referencias: S.D. =sin descompactar; Desc.= descompactado.

No hay diferencias significativas entre años, pero si entre sin descompactar y descompactado (cuadro 4). Las diferencias que se vieron entre los testigos (SD2015 y SD2016) están dadas por diferencias en los suelos donde se realizaron los tratamientos.

Cuadro No. 5 Efecto de las diferentes dosis de nitrógeno agregado sobre la concentración de N-NO<sub>3</sub> medido en diferentes estadios de la planta.

	N Z22	N Z30	N Z45
Sin fertilizar	4 ab	2,5 b	1,6 ab
Potasio	5 a	2,4 b	1,5 abc
Siembra	5 ab	2,4 b	1,5 bc
Siembra	4 b	2,4 b	1,5 bc
Siembra+Z22	5 ab	3,0 a	1,3 bc
Siembra+Z22+Z30	4 ab	3,0 a	1,7 a
Siembra+Z22+Z30+Z65	4 ab	2,8 a	1,7 a
Siembra+Z22+Z30+Z65	4 ab	3,0 a	1,6 ab

Cuadro No. 6 Interacción entre Año y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre la concentración de N-NO<sub>3</sub> en diferentes estadios de la planta.

	N Z22	N Z30	N Z45
2015.Sin fertilizar	4 abc	2,5 cde	1,7 ab
2015.Potasio	4 abc	2,2 e	1,6 ab
2015.Siembra	4 abc	2,2 de	1,5 ab
2015.Siembra	4 abc	2,2 de	1,5 b
2015.Siembra+Z22	4 abc	2,9abc	1,5 ab
2015.Siembra+Z22+Z30	4 bc	2,9 abc	1,7 ab
2015.Siembra+Z22+Z30+Z65	4 abc	2,8 abcd	1,8 a
2015.Siembra+Z22+Z30+Z65	4 bc	3,0 ab	1,7 ab
2016.Sin fertilizar	4 c	2,5 cde	1,5 b
2016.Sin fertilizar	5 a	2,5 bcde	1,5 b
2016.Potasio	4 abc	2,5 cde	1,5 b
2016.Siembra	3 c	2,5 bcde	1,6 ab
2016.Siembra	5 ab	3,2 a	1,2 abc
2016.Siembra+Z22	4 abc	3,2 a	1,7 ab
2016.Siembra+Z22+Z30	4 abc	2,9 abc	1,6 ab
2016.Siembra+Z22+Z30+Z65	4 abc	3,0 ab	1,5 ab

Referencia: Trat.=tratamiento

Cuadro No. 7. Interacción entre descompactación y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre la concentración de N-NO<sub>3</sub> en diferentes estadios de la planta.

	N Z22	N Z30	N Z45.
SD. Sin fertilizar	3 cd	2,5 cd	1,7 abc
SD. Potasio	5 abc	2,4 d	1,5 abcde
SD. Siembra	5 ab	2,4 d	1,5 bcd
SD. Siembra	4 abcd	2,4 d	1,6 abcd
SD. Siembra+Z22	4 abcd	3,0 ab	1,3 e
SD. Siembra+Z22+Z30	4 abcd	3,0 ab	1,8 a
SD. Siembra+Z22+Z30+Z65	4 bcd	3,0 abc	1,7 abc
SD. Siembra+Z22+Z30+Z65	5 ab	3,0 ab	1,7 abcd
D. Sin fertilizar	4 abcd	3,0 cd	1,5 cde
D. Potasio	5 abc	3,0 d	1,5 abcde
D. Siembra	4 abcd	2,0 d	1,5 abcde
D. Siembra	3 cd	2,0 cd	1,4 de
D. Siembra+Z22	5 a	3,0 ab	1,3 e
D. Siembra+Z22+Z30	4 bcd	3,0 bcd	1,6 abcde
D. Siembra+Z22+Z30+Z65	4 abcd	3,0 abc	1,7 ab
D. Siembra+Z22+Z30+Z65	4 d	3,0 ab	1,5 abcde

No hubo diferencia significativa en la concentración de nitrógeno en el suelo a Z22 entre el tratamiento realizado en el 2015 y el tratamiento realizado en el 2016, así como tampoco se observó diferencia significativa entre las parcelas sin descompactar y descompactadas (cuadro 4).

No se encontró diferencia significativa entre los tratamientos con aplicaciones de nitrógeno diferentes, ya que tratamientos sin agregado de nitrógeno a la siembra no presentaron diferencias significativas en su concentración de nitrógeno en relación al resto de los tratamientos los cuales fueron fertilizados con 40 unidades de nitrógeno en la siembra del cultivo. De todas formas el contenido de N-NO<sub>3</sub> a Z22 fue muy bajo para cualquiera de los casos (cuadro 5).

En cuanto a la concentración de nitrógeno en planta a Z30, no hubo diferencia significativa entre las parcelas descompactadas en 2015 y 2016, tampoco habiendo diferencia significativa entre los tratamientos descompactados y sin descompactar (cuadros 3 y 4).

El contenido de nitrógeno en planta a Z30 responde a lo esperado según los diferentes tratamientos de fertilización. Los tratamientos que recibieron 40 unidades de

nitrógeno a Z22 son los que presentaron un mayor contenido de nitrógeno en planta (cuadro 5)

No hubo diferencia significativa entre los tratamientos con dosis máxima hasta el momento, sin importar el año en que fueron laboreados sub-superficialmente, por lo que se puede concluir que la fertilización fue el único tratamiento que generó respuesta (cuadro 6).

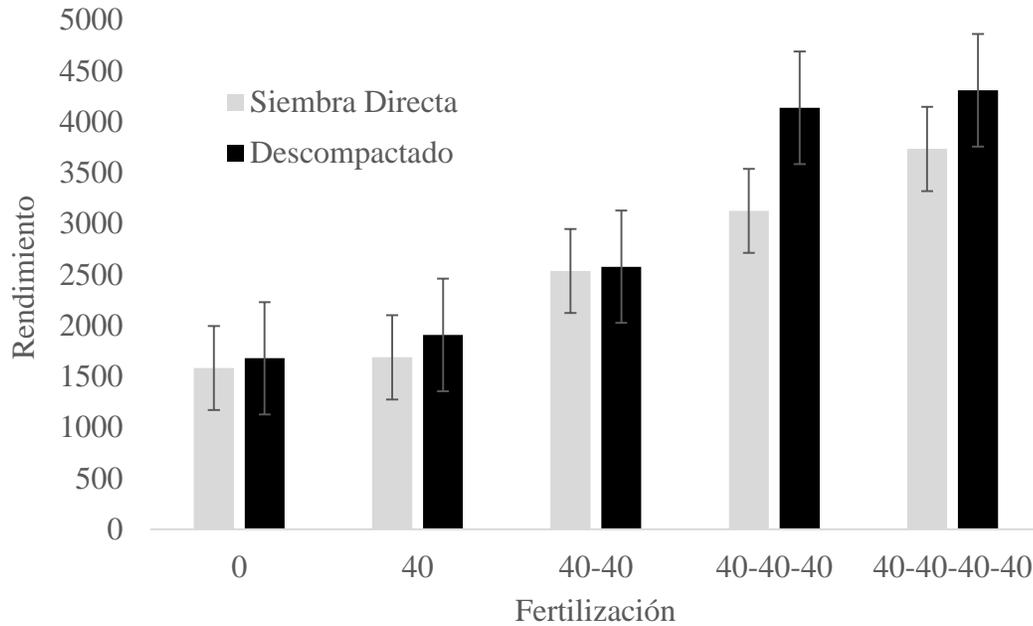
Observando la interacción entre tratamientos de fertilización y descompactado y sin descompactar, no parece haber respuesta a los diferentes tratamientos, y una vez más se observa que las parcelas con mayor contenido de nitrógeno agregado fueron las de mayor concentración de N-NO<sub>3</sub> a Z30 (cuadro 7).

No se observa diferencia significativa en nitrógeno a Z45 entre parcelas descompactadas y sin descompactar, así como tampoco un efecto residual que pueda diferenciar a los tratamientos del 2015 del 2016 (cuadros 3 y 4).

Los tratamientos con mayor agregado de nitrógeno previo al muestreo fueron los que presentaron mayor %N en esta variable (cuadro 5).

No hubo interacción entre descompactación y respuesta al nitrógeno (cuadros 6 y 7).

#### 4.2.2. Rendimiento y sus componentes



Referencias: 0= sin agregado de nitrógeno; 40= 40 unidades de N agregados a siembra; 40-40= 40 unidades de N agregado a siembra y a Z22; 40-40-40= 40 unidades de N agregados a siembra, a Z22 y Z30; 40-40-40-40= 40 unidades de N agregados a siembra, Z22, Z30 y Z65.

Figura No. 5 Rendimiento de trigo en función de agregado de nitrógeno y tratamiento

Los tratamientos con dosis máximas de fertilizante tanto descompactados como sin descompactar son los de mayores rendimientos, pero se puede observar en la figura 4 y el cuadro 10, que no presentan diferencias significativas con el tratamiento descompactado que recibió 40 unidades menos de nitrógeno (siembra+Z22+Z30+Z33). Eso podría estar indicando una interacción entre el laboreo sub-superficial y la respuesta al agregado de nitrógeno.

Cuadro No. 8 Efecto de las diferentes dosis de nitrógeno agregado sobre las diferentes variables medidas.

	Plantas/m <sup>2</sup>	Espigas/m <sup>2</sup>	P H.	PMG	Rend.
Sin fertilizar	118 ab	219 c	77,2 c	36,2 c	1629 c
Potasio	111 b	313 abc	77,0 c	36,7 bc	1634 c
Siembra	131 a	242 bc	76,9 c	36,4 c	1679 c
Siembra	120 ab	226 bc	77,4 c	37,1 bc	1917 bc
Siembra+Z22	127 ab	318 ab	77,1 c	37,2 bc	2557 b
Siembra+Z22+Z30	122 ab	397 a	77,7 bc	37,7 ab	3631 a
Siembra+Z22+Z30+Z65	125 ab	343 a	78,9 a	38,5 a	3999 a
Siembra+Z22+Z30+Z65	121 ab	393 a	78,6 ab	38,7 a	4044 a

Referencias: P. H.= Peso Hectolítico; PMG= Peso de mil granos en gramos; Rend.= Rendimiento estimado como kg de grano a 13.5% de humedad por hectárea.

Cuadro No. 9 Interacción entre año y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre diferentes variables medidas.

	P./m <sup>2</sup>	Esp./m <sup>2</sup>	P.H.	PMG	Rend
2015.Sin fertilizar	113 ab	193 e	77,3 d	35,9 d	1573 c
2015.Potasio	109 b	307 abcde	76,8 d	37,2 abcd	1563 c
2015.Siembra	122 ab	198 e	76,7 d	36,3 cd	1549 c
2015.Siembra	115 ab	239 cde	77,7 cd	37,6 abc	1771 bc
2015.Siembra+Z22	125 ab	259 cde	77,1 d	37,3 abcd	2207 bc
2015.Siembra+Z22+Z30	124 ab	375 abc	77,8 bcd	38,2 a	3680 a
2015.Siembra+Z22+Z30+Z65	116 ab	313 abcde	78,7 abc	38,7 a	3908 a
2015.Siembra+Z22+Z30+Z65	126 ab	355 abcd	77,9 abcd	38,8 a	3986 a
2016.Sin fertilizar	123 ab	246 cde	77,1 d	36,5 bcd	1684 bc
2016.Sin fertilizar	112 b	319 abcde	77,2 d	36,3 cd	1704 bc
2016.Potasio	139 a	287 bcde	77,1 d	36,4 bcd	1810 bc
2016.Siembra	125 ab	213 de	77,1 d	36,5 bcd	2063 bc
2016.Siembra	129 ab	378 abc	77,1 d	37,1 abcd	2907 ab
2016.Siembra+Z22	119 ab	418 ab	77,5 cd	37,2 abcd	3583 a
2016.Siembra+Z22+Z30	134 ab	372 abc	79,1 ab	38,4 a	4089 a
2016.Siembra+Z22+Z30+Z65	116 ab	431 a	79,2 a	38,7 a	4101 a

Referencia: P./m<sup>2</sup>.=Plantas por metro cuadrado; Esp./m<sup>2</sup>.= espigas por metro cuadrado; P. H.= Peso Hectolítico; PMG= Peso de mil granos en gramos; Rend.= Rendimiento estimado como kg de grano a 13.5% de humedad por hectárea.

Cuadro No. 10 Interacción entre descompactación y dosis de nitrógeno aplicado y su efecto sobre diferentes variables medidas.

	P/m <sup>2</sup>	Esp./m <sup>2</sup>	P H	PMG	Rend.
SD. Sin fertilizar	122 ab	220 def	76,9 d	35,8 g	1370 e
SD. Potasio	103 b	352 abcde	77,1 cd	36,3 efg	1796 e
SD. Siembra	125 ab	202 f	76,5 d	35,9 fg	1461 e
SD. Siembra	117 ab	232 cdef	77,5 bcd	37,0 bcdefg	1915 de
SD. Siembra+Z22	128 ab	275 bcdef	77,1 cd	36,7 defg	2536 cde
SD. Siembra+Z22+Z30	117 ab	420 a	77,6 bcd	37,0 bcdefg	3126 bcd
SD. Siemb.+Z22+Z30+Z65	113 ab	395 ab	79,1 a	38,5 abc	3623 abc
SD. Siemb.+Z22+Z30+Z65	121 ab	396 ab	78,7 ab	37,8 bcde	3844 ab
D. Sin fertilizar	114 ab	219 ef	77,5 bcd	36,6 efg	1887 e
D. Potasio	119 ab	273 bcdef	77,0 d	37,0 bcdefg	1471 e
D. Siembra	137 a	282 abcdef	77,4 cd	37,0 cdefg	1898 de
D. Siembra	122 ab	220 ef	77,3 cd	37,0 bcdefg	1919 de
D. Siembra+Z22	126 ab	362 abcd	77,1 cd	37,6 bcdef	2578 cde
D. Siembra+Z22+Z30	127 ab	374 abc	77,8 abcd	38,3 abcd	4137 ab
D. Siembra+Z22+Z30+Z65	136 a	291 abcdef	78,7 ab	38,6 ab	4374 a
D. Siembra+Z22+Z30+Z65	121 ab	389 ab	78,3 abc	39,7 a	4243 ab

Referencia: SD= Siembra Directa; D= Descompactado; P./m<sup>2</sup>.=Plantas por metro cuadrado; Esp./m<sup>2</sup>.= espigas por metro cuadrado; P. H.= Peso Hectolítico; PMG= Peso de mil granos en gramos; Rend.= Rendimiento estimado como kg de grano a 13.5% de humedad por hectárea.

Cuadro No. 11 Efecto de año y descompactación sobre diferentes variables medidas.

	2015	2016	S. D.	Desc.
Plantas/m <sup>2</sup>	119 a	125 a	118 a	125 a
Espigas/m <sup>2</sup>	280 a	280 a	311 a	301 a
P H.	77,5 a	78,7 a	78,6 a	78,6 a
PMG	37,1 a	37,5 a	36,9 a	37,7 a
REND.	2530 a	2743 a	2459 a	2813 a
%H 0-20	28,8 a	27,1 a	27,9 a	25,3 a
%H 20-40	35,3 a	28,0 b	31,6 a	32,5 a
%H 40-60	35,9 a	29,5 a	32,7 a	30,4 a

Referencias: S. D.= Siembra Directa; Desc.= Descompactado; P. H.= Peso Hectolítico; PMG= Peso de mil granos en gramos; Rendimiento= Rendimiento estimado como kg de grano a 13.5% de humedad por hectárea.

Cuadro No. 12 Interacción entre sitio y descompactación y su efecto sobre diferentes variables medidas.

	D2015	SD2015	D2016	SD2016
Plantas/m <sup>2</sup>	118 a	119 a	132 a	117 a
Espigas/m <sup>2</sup>	256 a	304 a	347 a	319 a
P H.	77,5 a	77,5 a	77,7 a	77,7 a
PMG	37,2 a	37,0 a	38,2 a	36,8 a
Rend.	2508 ab	2551 ab	3119 a	2367 b
%H 0-20	27,6 ab	28,8 a	24,4 b	27,1 ab
%H. 20-40	36,7 a	35,3 ab	27,8 b	28,0 b
%H. 40-60	41,2 a	35,9 a	21,2 c	29,5 b

Referencias: D.= Descompactado; SD.= Sin Descompactar; P. H.= Peso Hectolítrico; PMG= Peso de mil granos en gramos; Rendimiento= Rendimiento estimado como kg de grano a 13.5% de humedad por hectárea.

Para ninguna de las variables medidas hubo diferencia significativas entre el tratamiento sin fertilizar y el tratamiento que solo se le agregó potasio a la siembra, por lo que se puede concluir que este nutriente no fue limitante en ninguno de los casos.

Las diferencias no fueron significativa en el número de plantas por metro cuadrado. De todas formas, el número de plantas por metro cuadrado fue muy bajo. Considerando un peso de mil semillas de 35 gramos y una densidad de siembra de 100 kg/ha, sería el equivalente a 285 semillas por metro cuadrado, plantas por metro cuadrado, lo que nos dejaría con una implantación de entre 41 y 45%. Esto puede verse explicado por la gran cantidad de rastrojo de maíz presente al momento de la siembra y los excesos de lluvias durante el período de implantación.

Tratamientos con mayor fertilización previa a la Z45 son los que presentaron un mayor número de espigas por metro cuadrado mientras que tratamientos testigos fueron los menores, tal como era de esperar (cuadro 8).

Las tres parcelas con mayor dosis de nitrógeno agregado tenían mayor número de espigas por metro cuadrado, aunque no hubo diferencias significativas entre tratamientos de igual dosis de nitrógeno agregado pero diferentes años o entre descompactados y sin descompactar (cuadros 9 y 10)

No hay diferencia significativa en el número de espigas por metro cuadrado para los tratamientos descompactados y sin descompactar, así como tampoco hay diferencia entre años (cuadros 11 y 12)

Los tratamientos que fueron fertilizados hasta Z65, fueron los que presentaron mayor peso hectolítrico, poniéndolos en promedio por encima de 78, que es el valor mínimo exigido en el mercado hoy en día (cuadro 8).

No se puede ver una interacción clara entre fertilización y descompactación, ya que en el cuadro 9 se puede ver que los tratamientos fertilizado hasta Z65 del año 2016 son los mayores, pudiendo indicar una superioridad de los tratamientos descompactados más recientemente, pero en el cuadro 10 se observa que al comparar tratamientos con el mismo agregado de nitrógeno, el promedio de las parcelas descompactadas y sin descompactar es el mismo, por lo que se puede concluir que esta diferencia no es significativa y no hay interacción entre el laboreo subsuperficial y el peso hectolítrico.

No hubo diferencia significativa entre promedios del año 2015 y 2016, así como tampoco entre parcelas descompactadas y sin descompactar (cuadros 11 y 12).

Son los tratamientos de mayor fertilización los que tienen un mayor peso de mil granos (PMG), sin haber diferencia significativa entre los años 2015 y 2016 (cuadro 9 y 10). Tampoco se vio una diferencia significativa entre tratamientos descompactados y siembra directa.

Hubo diferencias en el contenido de humedad entre los 20 y 40 centímetros de profundidad entre el promedio de los años uno y dos (cuadro 11), pero no se observó diferencia entre descompactado y sin descompactar, así como tampoco cuando se analiza la interacción entre año y tratamiento (cuadro 12).

## 5. DISCUSIÓN

No se observó un aumento en la disponibilidad de nitrógeno en el suelo, lo que se contrapone con resultados obtenidos por autores como Hipps y Hodgson, citados por Martino (2001), Motavalli et al. (2003). La respuesta positiva se asocia a una mayor mineralización de la materia orgánica producto de la mejora de la aireación del suelo y la infiltración de agua en el mismo. Si bien hasta la siembra existieron condiciones favorables para la acumulación de  $\text{N-NO}_3^-$ , no se cuantificaron diferencias generadas por la descompactación sub superficial.

En este trabajo, el exceso de lluvias ocurrido durante el período post siembra explicar la reducida disponibilidad a  $\text{N-NO}_3^-$  en el suelo cuando el trigo alcanzó el estadio Z22. Frente a estas condiciones, la descompactación tampoco generó diferencias significativas.

Si bien los resultados no permiten discriminar si la falta de respuesta resultó de que la descompactación mejora el drenaje profundo, incrementando las pérdidas por lixiviación o, al menos favoreciendo el movimiento del  $\text{N-NO}_3^-$  a una profundidad mayor que la de muestreo utilizada (0-20 cm), o simplemente no generó diferencias en el aporte desde el suelo, la falta de interacción significativa entre el manejo del suelo y la fertilización nitrogenada sugiere que la descompactación no determinó una mejora en el aporte desde el suelo. Como resultado, la disponibilidad de  $\text{N-NO}_3^-$  en suelo fue igual a Z22, y no generó diferencias en el estado nutricional del cultivo a Z30 ni Z45.

Considerando el estado nutricional a Z30, muy bajo en ambos manejos del suelo, la recomendación de fertilización sería la misma. A Z45, la nutrición del cultivo ya no fue tan limitante, pero es importante considerar que el indicador no refiere a kg de nitrógeno absorbido, sino a nutrición del cultivo a esa etapa.

La fertilización nitrogenada a la siembra y en Z22 mejoró significativamente el estado nutricional del cultivo a Z30.

Al momento de la siembra, hubo condiciones desfavorables para la implantación del cultivo, como lo fueron el exceso de lluvias, que podrían haber afectado diferencialmente la implantación por mejora en la infiltración y dinámica del agua en el suelo (Martino, 1997). No obstante, la implantación fue baja e independiente de la descompactación.

Se cuantificó una interacción significativa sobre el rendimiento, resultante en un mayor rendimiento en los tratamientos D que en los SD a la dosis de nitrógeno definido por Siembra+Z22+Z30 (4137 contra 3126 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente, figura 4). Estas

diferencias se eliminaron a la dosis mayor de N agregado, definida por una aplicación adicional a Z65.

Este es el único resultado que sugiere un menor aporte de N desde el suelo en SD que en D, que requiere un incremento de N por fertilización bajo SD. Basados en datos de la Cámara Uruguaya de Servicios Agropecuarios (CUSA), el costo de pasar un subsolador es de U\$S 62 más 21 litros de gasoil (\$40). Con el valor del dólar a \$31,95 a la fecha, el costo total del laboreo sub-superficial es de U\$S 88.

Mientras que la tonelada de Urea azufrada puesta en el campo ronda los U\$S 450, con una formulación de 40-0-0-5, las 40 unidades de nitrógeno que se ahorran con el uso del laboreo sub-superficial, equivalen a 100 kg de urea azufrada. Según CUSA el costo de una fertilización común de hasta 100 kg por hectárea, tiene un precio de U\$S 10 más 1 litro de gasoil. Utilizando estos datos se llega a que el costo de aplicar los 100 kg de urea es de U\$S 56, por lo que se puede decir que no fue rentable el uso de esta herramienta.

Si se observa el tratamiento 3, el que había sido planificado para fertilizar según análisis de laboratorio, resulta que la fertilización no fue la adecuada.

A siembra se comienza con un promedio de entre 16 y 25 ppm de  $\text{NO}_3$  en el suelo, y un equivalente de fertilizante de entre 3 y 5, sea cual sea el caso hay una sobredosis de nitrógeno agregado.

Debido al exceso de precipitaciones en ese período, se llega a Z22 con niveles muy bajos de  $\text{NO}_3$  en el suelo, con una concentración promedio de 5 ppm. Utilizando un nivel crítico de 15 ppm, y un equivalente de fertilizante de 7, se deberían haber aplicado 70 unidades de nitrógeno (teórico fertilización de cereales de invierno).

A Z30 se llega con %2.4 de N en planta. Según el modelo de Baethgen (1992), para llegar al máximo potencial de rendimiento se debería haber aplicado al menos 76 unidades de N.

En ambos casos, tanto para Z22 como para Z30, se fertilizó por debajo de lo que indica el modelo de manejo de nitrógeno en cereales de invierno actualmente vigente en Uruguay.

## Nitrógeno agregado

Fertilización insuficiente	Fertilización suficiente	Aumento de fertilización
Limitante: disponibilidad de nitrógeno	Limitante: captura de recursos	Disponibilidad de recursos compensa menor captura

Figura No 6 Componentes limitantes del rendimiento en función del nitrógeno agregado.

La compactación del suelo afecta la capacidad de la planta de capturar recursos, entre ellos el nitrógeno del suelo.

Como se puede observar en la figura 5, cuando la fertilización es insuficiente, la compactación del suelo pasa a segundo plano, la capacidad para absorber recursos probablemente sea menor, pero la menor disponibilidad de este es la mayor limitante. Cuando se fertiliza con dosis adecuadas según el modelo de fertilización actualmente utilizado en Uruguay, se cubre la disponibilidad de recursos para la planta, pero al desarrollarse en suelos compactados, la capacidad de esta de capturarlos se ve limitada. Es aquí donde se observa diferencia entre cultivos desarrollados en suelos compactados y suelos donde se laboreó sub-superficialmente. El rendimiento es mayor en suelos descompactados, ya que cultivos con la misma disponibilidad de recursos, tienen una mayor capacidad para capturarlos, determinando un mayor rendimiento.

Al aumentar aún más el agregado de nitrógeno, el aumento en disponibilidad del recurso, compensa la menor capacidad de captura del mismo por parte de la planta, provocando que cultivos desarrollados tanto en suelos compactados como descompactados alcancen su máximo potencial.

## 6. CONCLUSIONES

En dosis máximas de nitrógeno agregado el uso del laboreo sub-superficial no provocó efecto en el rendimiento de trigo, ya sea residual como directo.

El laboreo sub-superficial generó aproximadamente 1000 kg ha<sup>-1</sup> de incremento de rendimiento de trigo bajo la actual estrategia de fertilización, la que fue eliminada incrementando la cantidad de N agregado con una nueva fertilización.

El laboreo sub-superficial no generó un aumento en el aporte de nitrógeno por parte del suelo.

El laboreo sub-superficial no generó un aumento en la capacidad de almacenamiento de agua por parte del suelo

Se mantiene la necesidad de evaluar la respuesta en años con menores precipitaciones, ya que el exceso hídrico del año en estudio puede haber afectado de manera significativa los resultados obtenidos

## 7. RESUMEN

La agricultura es un rubro de gran importancia para la economía del Uruguay, y en las últimas décadas, explicado por un alza en el precio de los granos, el rubro agrícola se ha expandido hacia nuevas zonas, siendo dominado por un sistema de siembra directa y agricultura continua. La eliminación de las praderas, así como la dominancia de la secuencia de cultivos trigo-soja en la rotación bajo un esquema de siembra directa, han generado problemas de degradación de la estructura del suelo, principalmente en forma de compactación, lo que genera una reducción en la capacidad de aporte de agua y nutrientes por parte de los suelos y una consecuente reducción en los rendimientos. Se propone la adopción del laboreo subsuperficial como método para subsanar este problema, método que se espera tenga un efecto residual. El estudio se realizó en el campo experimental de la Expoactiva, en el departamento de Soriano (33.445710 y 33.448214 de latitud Sur y los meridianos 57.900426 y 57.902602 de longitud Oeste), desde Julio de 2017 hasta diciembre del mismo año. El ensayo tuvo un diseño de bloques al azar, con 8 tratamientos que variaron en fertilización, realizados sobre suelo descompactado dos años previo al experimento, descompactados el año previo y sobre suelos que nunca fueron descompactados, junto a sus correspondientes repeticiones, dando lugar a un total de 64 parcelas. Cada parcela tuvo una medida de 5 metros por 5 metros, y se midió concentración de N-NO<sub>3</sub> a siembra, a Z22, porcentaje de pota en planta, porcentaje de nitrógeno a Z45, número de plantas por metro cuadrado, número de espigas por metro cuadrado, peso hectolítrico, peso de mil granos, humedad en grano, rendimiento pasado a kilogramos por hectárea con humedad del 13.5% y contenido de humedad en el perfil del suelo de los primeros 60 centímetros de profundidad separado en estratos de 20 centímetros. Los resultados obtenidos para las diferentes mediciones en la gran mayoría de los casos dieron diferencias significativas entre los tratamientos con dosis diferentes de nitrógeno agregado, pero no hubo diferencias significativas entre tratamientos descompactados y sin descompactar. Se observó que el promedio de los rendimientos de los tratamientos descompactados el año previo al ensayo fue superior al resto, dando indicios de que podría existir un efecto directo al laboreo sub-superficial, pero no residual. De todas formas, una vez desglosado los tratamientos según dosis de fertilizantes, se observó que las parcelas con dosis máxima de nitrógeno agregado rindieron lo mismo sin importar si habían sido descompactadas o no. Al analizar este desglose, se pudo apreciar que las parcelas descompactadas el año previo al ensayo con una dosis menos que la máxima, rindieron lo mismo que las parcelas con mayor agregado de urea azufrada, lo que estaría indicando una interacción entre el agregado de nitrógeno y el laboreo subsuperficial del suelo. De todas maneras, una vez analizados los costos, se llega a la conclusión que el uso de esta práctica no es rentable. Hay que recalcar que el año en estudio presentó condiciones climáticas atípicas, con temperaturas y precipitaciones por encima del promedio, lo que pueden haber afectado los resultados obtenidos.

Palabras clave: Compactación; Laboreo subsuperficial; Trigo.

## 8. SUMMARY

Agriculture is a sector of great importance for Uruguayan economy, and in recent decades, explained by a rise in the price of grains, the agricultural sector has expanded into new areas, being dominated by a system of no plowing and uninterrupted agriculture. The elimination of the grasslands, as well as the dominance of the wheat-soybean crops sequence in the agricultural rotation, have generated problems of degradation of the soil structure, mainly in the form of compaction, which generates a reduction in the capacity of water retention and nutrients contribution by the soil and a consequent reduction in yields. The adoption of subsurface tillage is proposed as a method to correct this problem, a method that is expected to have a residual effect. The study was carried out in the experimental field of the Expoactiva, in the department of Soriano (33.445710 and 33.448214 of South latitude and meridians 57.900426 and 57.902602 of West longitude), from July 2017 to December of the same year. The trial had a randomized block design, with 8 treatments that varied in fertilization, performed on soil decompacted two years prior to the experiment, decompacted the previous year and on soils that were never decompacted, together with their corresponding repetitions, giving rise to a total of 64 plots. Each plot had a measurement of 5 meters by 5 meters. Concentration of N-NO<sub>3</sub>, at Z22, percentage of nitrogen in plant, percentage of nitrogen to spikelet, number of plants per square meter, number of spikes per meter square, hectoliter weight, weight of a thousand grains, moisture in grain, yield converted to kilograms per hectare with humidity of 13.5% and moisture content in the soil profile of the first 60 centimeters of depth separated into strata of 20 centimeters was measured. The results obtained for the different measurements in the great majority of the cases gave significant differences between the treatments with different doses of added nitrogen, but there were no significant differences between decompacted and compacted treatments. It was observed that the average of the yields of the decompacted treatments the year prior to the test was higher than the rest, giving indications that there could be a direct effect to the subsoiler, but not a residual effect. Once the treatments were divided according to fertilizer doses, it was observed that the plots with maximum dose of added nitrogen yielded the same regardless of whether they had been decompacted or not. When analyzing this breakdown, it could be seen that the plots decompacted the year prior to the trial with a dose less than the maximum, yielded the same as the plots with the highest aggregate of sulfur urea, which would indicate an interaction between the addition of nitrogen and the subsoiling of the soil. In any case, once the costs have been analyzed, it is concluded that the use of this practice is not profitable. It must be emphasized that the year under study presented atypical climatic conditions, with temperatures and rainfall above the average, which may have affected the results obtained.

Keywords: Compaction; Labore subsuperficial; Wheat.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

1. Álvarez, C. R.; Torres Duggan, M.; Chamorro, E. R.; Taboada, M. A. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa; efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo*. 27(2): 159-169.
2. Alliaume, F.; Rossing, W. A. H.; García, M.; Giller, K. E.; Dogliotti, S. 2013. Changes in soil quality and plant available water capacity following systems re-design on commercial vegetable farms. *European Journal of Agronomy*. 46: 10-19.
3. Allmaras, R. R.; Juzwik, J.; Overton, R. P.; Copeland, S. M. 1994. Soil Compaction; Causes, Effects, Management in Bareroot Nurseries. In: Northeastern and Intermountain Forest and Conservation Nursery Association Meeting (1993, St. Louis, Missouri). Reports. St. Louis, USDA. Forest Service. pp. 19-32 (General Technical Reports).
4. Amézquita, E.; Chávez, L. F. 1999. La compactación del suelo y sus efectos en la productividad de los suelos. In: Congreso Costarricense de la Ciencia del Suelo (11º., 1999, San José, CR). El reto es producir y competir. Costa Rica, s.e. p. irr.
5. Arbeletche, P.; Carballo, C. 2007. Dinámica agrícola y cambios en el paisaje. *Cangüé*. no. 29: 55-59.
6. Arvidsson, J.; Håkansson, I. 1996. Do effects of soil compaction persist after ploughing? Results from 21 long-term field experiments in Sweden. *Soil and Tillage Research*. 39(3): 175-197.
7. Barolin, S. 2018. Efecto de la descompactación Sub-superficial sobre el rendimiento de soja. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 57 p.
8. Bingham, I. J. 2001. Soil root canopy interactions. *Annals of Applied Biology*. 138(2): 243-251.
9. Blackwell, P. S.; Green T. W.; Mason W. K. 1990. Response of biopore channels from roots to compression by vertical stresses. *Soil Science Society of America Journal*. 54(4): 1088-1091.

10. Boone, F. R.; Van Der Werk, K. H.; Kroesbergen B.; Ten Hag, B. A.; Boers, A. 1986. The effect of compaction of the arable layer in Sandy soil on the growth of maize for silage. 1. Mechanical impedance. Netherlands Journal of Agricultural Science. 34: 155-171.
11. Botta, G. F.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Rossato, H. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic in ten sites; effect of soybean (*Glycine max* L.) yields. Soil and Tillage Research. 78(1): 53-58.
12. Carpenter, T. G.; Faussey, N. R.; Reeder, R. C. 1985. Theoretical effects of wheel loads on subsoil stresses. Soil and Tillage Research. 6: 179-192.
13. Cazorla, C. R.; Masiero, B. 2005. Resistencia a la penetración como indicador de compactación en ensayos de larga duración bajo siembra directa en Marcos Juárez. In: Díaz-Rosello, R. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 123-132.
14. Cholaky, C. G.; Cisneros, J. M.; Uberto, M. E.; Vignolo, C.; Giayetto, O. 2007. Degradación-recuperación de la condición hidrofísica de Haplustoles/udoles del sur cordobés manejados con siembra directa. In: Díaz-Rosello, R. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 97-108.
15. Cubilla, M.; Reinert, D. J.; Aita, C.; Reichert, J. M. 2002. Plantas de cobertura do solo; uma alternativa para aliviar a compactação em sistema plantio direta. Plantio Direto. 71: 29-32.
16. CUSA (Camara Uruguaya de Servicios Agropecuarios, UY). Precios sugeridos de labores agrícolas. (en línea). Mercedes, Soriano s.p. Consultado ago. 2018. Disponible en [http://www.cusa.org.uy/cusa/precios\\_servicios\\_agricolas](http://www.cusa.org.uy/cusa/precios_servicios_agricolas)
17. Danfors, B. 1974. Compaction in the subsoil. Uppsala, Swedish Institute of Agricultural Engineering. 91 p. (Report no. S 24).
18. Dejong-Hughes, J.; Moncrief, J. F.; Voorhees, W. B.; Swan, J. B. 2001. Soil compaction; causes, effects and control. (en línea). Morris, University of Minnesota. s.p. Consultado 15 ago. 2018. Disponible en

<http://www.extension.umn.edu/agriculture/tillage/soil-compaction/index.html>

19. Dexter, A. R. 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil and Tillage Research*. 11(3): 199-238.
20. De Melo, V.; Melgar, R.; Vitti, G. 2011. Soja en Latinoamérica; fertilizando para altos rendimientos. Buenos Aires, Argentina, Agroeditorial. 180 p.
21. Díaz Zorita, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interaction on dry land corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil and Tillage Research*. 54: 11-19.
22. Elkins, C. B.; Van Sickle, K. 1984. Punching holes in plow pans. *Solutions*. 28: 38-41.
23. Ernst, O.; Bentancur, O. 2004. Efecto del laboreo sub-superficial y manejo del barbecho químico sobre la disponibilidad de N-NO<sub>3</sub>-en el suelo y rendimiento de maíz en siembra directa después de avena pastoreada. *Agrociencia* (Montevideo). 8(1): 29-40.
24. \_\_\_\_\_; Siri, G. 2011. La agricultura en el Uruguay, su trayectoria y consecuencias. *In: Simposio Nacional de Agricultura (2º., 2011, Paysandú)*. No se llega, si no se sabe a dónde ir. Montevideo, Hemisferio Sur. pp. 149-163.
25. Evans, S. D.; Lindstrom, M. J.; Voorhees, W. B.; Moncrief, J. F.; Nelson G. A. 1996. Effect of subsoiling and subsequent tillage on soil bulk density, soil moisture, and corn yield. *Soil and Tillage Research*. 38: 35-46.
26. García-Préchac, F.; Ernst, O.; Siri-Prieto, G.; Terra, J. A. 2004. Integrating no-till to crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil and Tillage Research*. 77(1): 1-13.
27. Gentile, R. M. 2002. Forages for soil improvement in Uruguayan cropping systems. Winnipeg, Manitoba, University of Manitoba. 94 p.
28. Glinski, J.; Lipiec, J. 1990. Soil physical conditions and plant roots. Boca Raton, FL, CRC. 250 p.
29. Håkansson, I. 1985. Swedish experiment on subsoil compaction by vehicles with high axle load. *Soil Use and Management*. 1(4): 113-116.

30. \_\_\_\_\_.; Voorhees, W. B.; Elonen, P.; Raghavan, G. S. V.; Lowery, B.; Van Wijk, A. L. M.; Riley, H. 1987. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yield in humid regions with annual freezing. *Soil and Tillage Research*. 10(3): 259-268.
31. Harris, W. L. 1971. The soil compaction process. In: Barnes, K. K. ed. *Compaction of agricultural soils*. St. Joseph, Michigan, USA, American Society of Agricultural Engineers. pp. 9-44.
32. Hipps, N. A.; Hodgson, D. R. 1988. Residual effects of a slant-legged subsoiler on same soil physical conditions and the root growth of spring barley. *The Journal of Agricultural Science*. 110: 481- 489.
33. Ishaq, M.; Hassan, A.; Saeed, M.; Ibrahim, M.; Lal, R. 2000. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan; 1. Soil physical properties and crop yield. *Soil and Tillage Research*. 1570: 1–9.
34. \_\_\_\_\_.; Ibrahim, M.; Hassan, A.; Saeed, M.; Lal, R. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan; II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil and Tillage Research*. 60: 153–161.
35. Johnson, J. F.; Voorhees, W. B.; Nelson, W. W.; Randall, G. W. 1990. Soybean growth and yield as affected by surface and subsoil compaction. *Agronomy Journal*. 82: 973–979.
36. Kantolic, A. 2003. Bases funcionales de la determinación del rendimiento y manejo del cultivo de soja. In: Satorre, E. ed. *El libro de la soja*. Buenos Aires, s.e. pp. 31-44.
37. Larson, W. E.; Eynard, A.; Hadas, A.; Lipiec, J. 1994. Control and avoidance of soil compaction in practice. In: Soane, B. D.; van Ouwerkerk, C. eds. *Soil compaction in crop production*. Amsterdam, Elsevier. pp. 597-625.
38. Letey, J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. *Advances in Soil Science*. 1: 273-294.
39. Lowery, B.; Schuler, R. T. 1991. Temporal effects of subsoil compaction on soils strength and plant growth. *Soil Science Society of America Journal*. 55(1): 216–223.

40. Martino, D. 1997. Siembra directa en los sistemas agrícola ganaderos del litoral. Montevideo, INIA. 28 p. (Serie Técnica no. 82)
41. \_\_\_\_\_.1998. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding systems in Uruguay. Tesis PhD. Manitoba, Canada. University of Manitoba. 264 p.
42. \_\_\_\_\_.; Ponce de León, F. 1999. Canola; una alternativa promisoría. Montevideo, INIA. 98 p. (Serie Técnica no. 105)
43. \_\_\_\_\_.2001. Manejo de restricciones físicas del suelo en sistemas de siembra directa. In: Díaz Roselló, R. ed. Siembra directa en el cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 225-257.
44. \_\_\_\_\_. DSA. DIRENARE (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. División de Suelos y Aguas. Dirección Nacional de Recursos Naturales, UY). 2006. Compendio actualizado de información de suelos del Uruguay. Montevideo. Esc. 1: 1000000. 1 disco compacto.
45. Molfino, J. 2013. Potencial agrícola, algunos cálculos para agricultura en secano. Cangüé. no. 33: 14-18.
46. Motavalli, P.; Stevens, W. E.; Hartwig, G. 2003. Remediation of subsoil compaction and compaction effects on corn N availability by deep tillage and application of poultry manure in a sandy-textured soil. Soil and Tillage Research. 71(2): 121-131.
47. Mozzaquatro, R.; Raffo, M. A. 2016. Respuesta de soja a la descompactación sub-superficial del suelo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 52 p.
48. Müller, M. M. L.; Cecon, G.; Rosolem, C. A. 2001. Influência da compactação do solo em subsuperfície sobre o crescimento aéreo e radicular de plantas de adubação verde de inverno. Revista Brasileira de Ciencia do Solo. 25: 531-538.
49. Passioura, J. B. 2002. Soil conditions and plant growth. Plant, Cell and Environment. 25(2): 311-318.
50. Porterfield, J. W.; Carpenter, T. G. 1986. Soil compaction; an index of potential compaction for agricultural tires. Transaction of the ASAE. 29(4): 917-922.

51. Pravia, V. 2009. Uso de los elementos de agricultura de precisión y modelos de simulación para la incorporación de la dimensión espacio-temporal en la investigación de cultivos agrícolas; A) impacto de prácticas de manejo de suelos y atributos del terreno en la productividad de sorgo a escala de chacra, B) Simulación de la producción de arroz en Uruguay utilizando el modelo DSSATv4 CERES-Rice. Tesis MSc. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 102 p.
52. Radford, B. J.; Yule, D. F.; Mc Garry, D.; Playford, C. 2001. Crop responses to tilled soil compaction and to compaction repair treatments. *Soil and Tillage Research*. 61: 157-166.
53. Sadras, V. O.; O'leary, G. J.; Roget, D. K. 2005. Crop responses to compacted soil; capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. 91(2): 131-148.
54. Schaffer, R. L.; Johnson, C. E.; Koolen, A. J.; Gupta, S. C; Horn, R. 1992. Future research needs in soil compaction. *Transactions of the ASAE*. 35(6): 1761-1770.
55. Sawchik, J. 2007. Algunas restricciones físicas e hídricas para el crecimiento de los cultivos en Uruguay. In: Díaz Rosello, R. ed. Aportes de la ciencia y la tecnología al manejo productivo y sustentable de los suelos del cono Sur. Montevideo, PROCISUR. pp. 165-169.
56. Taylor, J. H. 1987. A rationale for controlled traffic research. *Acta Horticulturae*. no. 210: 9-18.
57. Threadgill, E. D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transaction of the ASAE*. 25(4): 859-863.
58. Torbert, H. A.; Wood, C. W. 1992. Effects of soil compaction and water filled pore space on soil microbial activity and N losses. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 23(11-12): 1321-1331.
59. Varsa, E. C.; Chong, S. K.; Abolaji, J. O.; Farquhar, D. A.; Olsen, F. J. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil Tillage Research*. 43: 219-228.
60. Wolkowski, R. P. 2000. Efficacy of deep tillage in Wisconsin. In: Wisconsin Crop Management Conference (2000, s.l.). Proceedings. Madison, WI,

University of Wisconsin. Department of Soil Science. Extension  
Division. s.p.