



Universidad de Buenos Aires
Facultad de Agronomía

TRABAJO CORRESPONDIENTE AL CICLO DE INTENSIFICACIÓN PARA
ACCEDER AL TÍTULO DE GRADO DE INGENIERO AGRÓNOMO

**Labranza en franjas: su efecto sobre la compactación del suelo y
el rendimiento en un cultivo de maíz.**

Intensificando: Marcos Andrés Roba

Director: Ing. Agr. Esteban Ciarlo

Consultor: Ing. Agr. Mario Omar Tesouro

Mayo 2016

“Try and fail, but don't fail to try.”

John Quincy Adams

“Después de los 18 años ‘no me dijeron’, ‘no supe’ y ‘no pude’ significan lo mismo: no quise hacerlo.”

Liliana Elguezábal

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, a mis amigos y a mis compañeros de trabajo, nunca hubiera podido afrontar una carrera universitaria sin su apoyo. Agradecer a la FAUBA, por la calidad, el empeño y el afecto de su gente, en particular a Esteban Ciarlo y Omar Tesouro, por su paciencia y dedicación.

Invariablemente, a Pina.

Pero si pusiera los nombres de toda la gente a la que quiero darle las gracias, me pasaría bastante tiempo tipeando nombres y varios días decidiendo si la escribo por orden alfabético, por orden de aparición o siguiendo alguna escala cualitativa.

Decidí preparar un mate y honrarlos de mejor forma.

Resumen

La disponibilidad de nutrientes del suelo depende no solo de la capacidad de cada cultivo para captarlos, sino también de la capacidad del suelo para almacenarlos y mantenerlos disponibles. Esta relación está determinada en gran parte por la fertilidad física del suelo. La compactación es uno de los problemas que más afectan la disponibilidad de esos recursos. La compactación modifica el volumen y la estructura de los poros del suelo, reduce su tamaño y el número de los macroporos, afectando su forma y su continuidad. En consecuencia, altera el estado de agregación y las interacciones existentes entre las fases sólida, líquida y gaseosa, disminuyendo la conductividad hidráulica, la permeabilidad y la difusión del agua y el aire a través del sistema poroso. Esto afecta directamente el transporte, absorción y la transformación de los nutrientes.

En suelos susceptibles, el grado de compactación aumenta proporcionalmente a la cantidad de años que se suceden los cultivos sin labranza. También que los suelos laboreados son más susceptibles a la compactación que suelos no disturbados. La relación entre el suelo y el manejo de los cultivos determina no solo gran parte del rendimiento sino la potencialidad de los futuros cultivos. Por este motivo, se han desarrollado técnicas paliativas para reducir los efectos del aumento de la intensidad en la agricultura. El objetivo de este trabajo es determinar el rendimiento de un cultivo de maíz frente a dos sistemas de manejo; de los resultados que se obtengan se espera poder determinar la factibilidad y la efectividad de una de esas técnicas paliativas, la labranza en franjas.

Con la intención de realizar la comparación entre el sistema de labranza en franjas y el sistema de siembra directa, se contrastaron los datos obtenidos con ambos sistemas en parcelas apareadas, siguiendo un diseño factorial de dos factores: situación de compactación y sistema de manejo. Para reducir las variaciones espaciales que pudieran existir dentro de las parcelas los tratamientos se realizaron próximos entre sí. Cada repetición consta de 8 surcos individualizados y apareados.

Se encontraron diferencias en el rendimiento, siendo la implantación con labranza en franjas la que mejores resultados obtuvo. Se vieron diferencias en los parámetros del suelo estudiados, los cuales mostraron valores significativamente más bajos cuando a las parcelas compactadas se les aplicó el tratamiento de labranza en franjas.

Tabla de contenidos

	Página
Índice de Tablas	vi
Índice de Figuras	vii
<hr/>	
1. Introducción	1
<hr/>	
2. Materiales y métodos	6
<hr/>	
2.1. Antecedentes del sitio	6
<hr/>	
2.2. Registros metereológicos	7
<hr/>	
2.3. Descripción del ensayo	8
<hr/>	
2.4. Recolección, determinación y análisis de datos	11
<hr/>	
2.5. Análisis estadísticos	12
<hr/>	
3. Resultados y discusión	13
<hr/>	
3.1. Implantación	13
<hr/>	
3.2. Densidad aparente	15
<hr/>	
3.3. Resistencia a la penetración	18
<hr/>	
3.4. Humedad gravimétrica	24
<hr/>	
3.5. Rendimiento	26
<hr/>	
4. Conclusiones	30
<hr/>	
Bibliografía	31
<hr/>	

Índice de Tablas

	Página
Tabla 2.2.1: Datos meteorológicos de Octubre de 2011 a Abril 2012.	7
Tabla 2.2.2: Humedad gravimétrica del suelo al momento de la siembra (0 a 20 cm).	7
Tabla 3.1.1.: Estadística descriptiva de la variable Plantas por metro (pl m^{-1}) para cada combinación tratamiento y subtratamiento.	13
Tabla 3.1.2.: Valores medios de Eficiencia de implantación (E_i) para cada combinación tratamiento y subtratamiento.	14
Tabla 3.2.1: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del sistema de labranza para cada tratamiento de compactación sobre la densidad aparente media.	16
Tabla 3.2.2: Análisis de la varianza de la variable DAP (g cm^{-3}) para las distintas combinaciones de tratamientos, observadas para cada profundidad.	17
Tabla 3.3.1: Resistencia a la penetración media (kPa) y su coeficiente de variación (CV %) para las distintas combinaciones de tratamientos, separadas por profundidad. En el surco de siembra.	19
Tabla 3.3.2: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del Tratamiento, Subtratamientos y sus interacciones sobre la resistencia a la penetración media (kPa), para las tres distancias al surco y promediando cada perfil (0 a 45 cm).	20
Tabla 3.3.3: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del sistema de labranza para cada tratamiento de compactación sobre la resistencia a la penetración en el surco de siembra. Interacciones. Promedio de cada perfil (0 a 45 cm).	20
Tabla 3.3.4: Contrastes ortogonales del efecto del método de surcado en las parcelas compactadas sobre la resistencia a la penetración. Promedio de cada perfil (0 a 45 cm).	21
Tabla 3.5.1: Rendimiento medio del cultivo de maíz (kg ha^{-1}) para los distintos tratamientos aplicados.	27
Tabla 3.5.2: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del sistema de labranza para cada tratamiento de compactación sobre el rendimiento promedio (kg ha^{-1}).	29

Índice de Figuras

	Página
Figura 2.1.1: Valores medios de rendimiento (kg ha^{-1}) para cada tratamiento y subtratamiento.	6
Figura 2.3.1: Valores de densidad aparente (DAP, g cm^{-3}) promedios para cada tratamiento, sin separar por profundidad.	8
Figura 2.3.2: Mapa de resistencia a la penetración (kPa), para el tratamiento compactado previo a la implantación. Referencias: eje de abscisas, distancia transversal a los surcos (cm); eje de ordenadas, profundidad (cm).	9
Figura 2.3.3: Accesorio de labranza evaluado en el ensayo. Órganos activos: (a) escarificador de arco rígido, (b) cuchilla labrasurco; órganos de fijación del conjunto: (d) brazo regulable porta cuchilla, (e) brida de anclaje, (g) bastidor; (f) ruedas tapadoras/compactadoras y (c) resortes de compensación.	10
Figura 2.3.4: Detalle del accesorio de labranza evaluado en el ensayo en posición de trabajo.	11
Figura 3.1.1: Vista en detalle del sitio experimental, día 14 después de la implantación. Luego de la siembra los surcos fueron cubiertos a modo de protección.	14
Figura 3.2.1: Valores medios de densidad aparente (DAP, g cm^{-3}) para cada tratamiento de labranza, sin separar por profundidad.	15
Figura 3.2.2: Valores medios de DAP (g cm^{-3}) discriminada para cada tratamiento y subtratamiento, según profundidad.	17
Figura 3.3.1: Valores medios de resistencia a la penetración (IC, kPa) en el surco, por profundidad, discriminada para cada tratamiento y subtratamiento.	18
Figura 3.3.2: Valores medios de resistencia a la penetración (IC, kPa) discriminada para cada tratamiento y subtratamiento, según posición en la transecta.	21
Figura 3.3.3: Mapas de resistencia a la penetración (kPa), para cada tratamiento y subtratamiento.	22
Figura 3.4.1: Valores medios de humedad gravimétrica (%) en el surco por profundidad, para cada tratamiento y subtratamiento.	24
Figura 3.4.2: Valores medios de humedad gravimétrica (%) por profundidad, para cada tratamiento y subtratamiento.	25
Figura 3.4.3: Valores medios de humedad gravimétrica (%) por profundidad, para cada tratamiento.	25

Figura 3.5.1: Valores medios de rendimiento (kg ha^{-1}) para los tratamientos de compactación y sistema de labranza. 27

Figura 3.5.2: Vista de una de las parcelas en estudio. 29

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**LABRANZA EN FRANJAS: SU EFECTO SOBRE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO Y EL
RENDIMIENTO EN UN CULTIVO DE MAÍZ.**

MARCOS ANDRÉS ROBA

TRABAJO CORRESPONDIENTE AL CICLO DE INTENSIFICACIÓN PARA ACCEDER AL
TÍTULO DE GRADO DE INGENIERO AGRÓNOMO

DIRECTOR: ESTEBAN CIARLO

1. Introducción.

El impacto de las actividades agrícolas sobre el suelo ocurre en diferentes etapas de espacio y tiempo (Kay y VandenBygaart, 2002). Algunas reacciones del suelo a los disturbios ocurren en el corto plazo, otras requieren semanas, meses e incluso décadas para expresarse. Estos autores señalan que esta respuesta está determinada por la complejidad de relaciones entre las distintas fracciones, bióticas y abióticas del suelo. Asimismo, la modificación de la estructura del suelo afecta diferentes propiedades biológicas, físicas y químicas del mismo (Six et al., 2004; Díaz-Zorita et al., 2002; Miransari, 2009).

Jung et al. (2010) enfatizan que cuando el suelo se encuentra compactado, el espacio poroso se reduce y que otras propiedades físicas y químicas del suelo (como el contenido hídrico, la permeabilidad y la densidad) se ven afectadas de tal manera que el desarrollo de las raíces y el crecimiento del cultivo se ven negativamente afectados. Estos autores también concluyen que para mantener las condiciones óptimas de crecimiento de los cultivos, es crucial contar con herramientas que tengan en cuenta las interacciones de los sistemas de manejo de cultivo y los suelos en los diferentes escenarios.

En su editorial del año 1996, la Soil Science Society of America, publica la siguiente definición: compactación es el proceso por el cual las partículas del suelo sufren un rearrreglo, aumentando el contacto entre si mismas, disminuyendo el espacio poroso e incrementando la densidad aparente. Según la terminología de ASAE Standards (1996), la compactación del suelo es la consolidación, reducción en la porosidad y el colapso de la estructura del suelo, cuando está sometido a cargas superficiales. Conforme a lo expresado por Swan et al. (1987), compactación es el efecto de compresión de una fuerza mecánica sobre el suelo. Este efecto disminuye el volumen ocupado por los poros e incrementa la densidad aparente y la tensión de los agregados del suelo. En ese mismo sentido, Soane y VanOuwkerk en 1995, declararon que la compactación modifica el volumen y la estructura de los poros del suelo, reduce el tamaño y el número de los macroporos, afectando su forma y su continuidad. Los mismos autores afirman que la compactación además altera el estado de agregación y las interacciones existentes entre las fases sólida, líquida y gaseosa, disminuyendo la conductividad, la permeabilidad y la difusión del agua y del aire a través del sistema poroso.

Existen varios factores que producen la compactación de suelos (Raper, 2005). En principio, un suelo puede ser susceptible a la compactación y ello está determinado

principalmente por su textura (Chen et al., 1998; Raper, 2005). Los suelos labrados, son propensos a la re-consolidación e incluso a re-compactación (Busscher et al., 1986; Carter, 1988 a y b; Spoor, 2006). Algunos autores han encontrado evidencias de suelos que al re-compactarse alcanzan grados de compactación mayores aún a los medidos previos a la labranza (Busscher et al., 1986; Sojka et al., 1990; Unger, 1993; Quiroga et al., 1999). La humedad del suelo es determinante de la compactabilidad del suelo (Koch, 2008). Por ejemplo, Raper (2005) encontró que el tránsito en suelos por encima del 60% de la capacidad de campo puede generar efectos negativos en los cultivos subsiguientes. El tránsito de vehículos pesados (Håkansson y Reeder, 1994; Koch, 2008; Botta et al., 2014) o el tránsito reiterado de vehículos de poca carga, generan impedancias superficiales y sub-superficiales (Gaultney et al., 1982). Las huellas generadas por el tránsito, no sólo generan compactación y dificultan la infiltración, sino que dependiendo de la exposición del terreno y el régimen hídrico, incluso pueden ser promotoras de erosión del tipo laminar. (Raper, 2005).

La compactación se encuentra fuertemente influenciada por el contenido hídrico del suelo (Paredes et al. 2007) y ha sido reconocida ampliamente como la causa de restricciones al desarrollo radicular y rendimiento de numerosos cultivos. En el año 1982, Gaultney et al. estudiaron el efecto de la compactación del subsuelo sobre el rendimiento de maíz. Informaron que compactaciones severas en veranos relativamente húmedos, provocaron reducciones en el rendimiento de alrededor del 50 %. Mientras que con subsuelos moderadamente compactados, las mismas alcanzaron al 25 %. En ciclos con menores precipitaciones, las mermas fueron del orden del 25%, para ambos casos. Es destacable además que existe una relación entre el contenido de humedad y el nivel de aireación del suelo. Cuando todos los poros se encuentran saturados de agua, la tensión de oxígeno del suelo disminuye considerablemente. Esta situación puede perjudicar el normal crecimiento de la mayoría de los cultivos. Por consiguiente, mantener un buen nivel de porosidad estructural del suelo resulta relevante. En este sentido, la remoción del suelo adquiere importancia al momento de pensar la recuperación de la porosidad. Sin embargo, se debe prestar especial atención a la capacidad portante del suelo, para asegurar la transitabilidad y evitar la re-compactación. Por este motivo, en la mayoría de los casos, la inversión de la gleba puede resultar perjudicial. Según Raper y Bergtold (2007) muchos suelos responden positivamente al subsolado, incluso normalmente se pueden encontrar mejoras en el rendimiento.

Sin embargo, el efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos, puede no ser perceptible debido a las variaciones ambientales e interacciones complejas (Paredes et

al. 2007). Cultivos en suelos con compactación sub-superficial reaccionan de manera diferente en años secos o húmedos. (Álvarez et al. 2006; Bicki y Siemens, 1991). En estudios con un suelo arcillo-limoso Al-Adawi y Reeder (1996) concluyen que la compactación afecta el desarrollo y el crecimiento de los cultivos en forma mas importante cuando no hay otros factores limitantes tales como la disponibilidad de agua y nutrientes, en coincidencia con Bicki y Siemens (1991), Schuler y Wood (1992), Sadras et al. (2005) y Álvarez et al. (2006). Contribuyendo a la variabilidad en la respuesta del rendimiento, Goodman y Ennos (1998) encontraron que las plantas de maíz y girasol, son capaces de adaptar sus raíces en respuesta a la resistencia o dureza del suelo, pero que esos cambios en el crecimiento de las raíces no siempre compensan las alteraciones en las condiciones del suelo. En ese mismo sentido, Tollenar y Wu (1999) señalaron que bajo condiciones de estrés, las diferentes irregularidades ambientales influyen en los cultivos dependiendo de la diferente capacidad que estos tengan para captar y utilizar los recursos.

No siempre hay consenso entre los autores en cuanto a los efectos de la práctica de siembra directa sobre los diferentes ambientes y cultivos. Algunos ambientes reaccionaron positivamente a la implementación de la tecnología de no-labranza, no sólo respecto a la disminución de la erosión o mejorando parámetros como el contenido de materia orgánica y la fertilidad (Michelena e Irurtia, 2006, Bono et al., 2008), sino también mejorando los rendimientos de los cultivos (Reeder, 2002). Bono et al. (2008) señalaron que un suelo con altos contenidos de arena y limo, no fue susceptible a la compactación luego de la incorporación de la no labranza; salvo en los primeros 5 centímetros del perfil. Otros autores en cambio, vieron afectados algunos de sus parámetros estructurales y sobre todo su capacidad de infiltración (Morrison, 2002; Munkholm et al., 2003; Álvarez et al., 2006; Miransari, 2009). Según Unger (1995) condiciones físicas de suelo adversas que limitan la infiltración del agua, el desarrollo de las raíces y reducen los rendimientos, pueden desarrollarse cuando se utiliza un sistema sin labranza en regiones húmedas o en cultivos bajo riego. Chen et al. (1998) encontraron que la densificación del suelo es usualmente mayor en siembra directa, siendo esto medido tanto en superficie como en profundidad. Morrison (2002) encontró que en áreas húmedas y de suelos pesados, donde el drenaje superficial y sub-superficial es imprescindible para la producción, la siembra sin labranza vertical, sólo empeora la situación; lo que se corrobora con lo expuesto por Licht y Al-Kaisi en su trabajo del año 2005. En un ensayo sobre un suelo franco limoso pobremente estructurado, Munkholm et al. (2003) concluyeron que a pesar de la adaptación del sistema de siembra directa en una región húmeda y templada, la compactación del suelo es un factor crítico para los cultivos bajo ese manejo, y sugirieron además que deberían realizarse periódicamente labranzas verticales, para remover la

parte inferior de la capa sub-superficial. Reeder, en su revisión del año 2002, concluye que en regiones secas, la siembra directa seguirá haciendo posible los cultivos anuales. Y en regiones húmedas, se deberá evaluar la implementación de labranzas disturbando sólo la cantidad necesaria de suelo, dejando la mayor cobertura superficial posible.

Los sistemas de labranza modifican la estructura del suelo y, dependiendo del contenido de humedad de éste, ella favorece o destruye la estructura, repercutiendo en el crecimiento y desarrollo de los cultivos (Navarro Bravo et al., 2000). De acuerdo con lo expresado por Spoor (2006) las operaciones mecánicas están limitadas en su desempeño, y su rol es el de acompañar las condiciones ambientales y los procesos biológicos, que son en definitiva los responsables de crear y sostener las mejores condiciones físicas del suelo. Este autor arriba a la conclusión de que la efectividad del manejo del suelo puede verse aumentada a través de un mejor entendimiento del comportamiento del suelo disturbado, los tipos de disturbios, la resiliencia y de los equipos que pueden ser usados para obtener el resultado deseado.

La labranza en franjas (in-row tillage, strip-tillage), en especial el subsolado (in-row subsoiling), es una herramienta muy difundida en los Estados Unidos para reducir el efecto de la compactación de suelos mientras se mantiene la cobertura con rastrojos reduciendo los efectos erosivos (Campbell et al., 1974; Box y Langdale, 1984; Raper et al., 1994; Raper et al., 1998; Busscher y Bauer, 2003; Raper, 2005; Raper y Bergtold, 2007; leído de Raper y Schwab, 2009). Para J. E. Morrison (2002) el concepto de strip-tillage es proveer una estrecha zona labrada y sin cobertura, para luego ser utilizada por los trenes de siembra convencionales sin el problema de los rastrojos; mejorando la disponibilidad de agua. Sin embargo, no siempre se encuentra respuesta en mejores rendimientos de los cultivos y ello depende del ambiente y las precipitaciones. Licht y Al-Kaisi (2005) concluyeron que la labranza en franjas permite aumentar la acumulación del agua en el perfil, disminuir la resistencia a la penetración y elevar en casi 2 °C la temperatura del suelo, en relación a la siembra directa. Es posible, además, que estos beneficios sobre la siembra directa tengan el potencial para promover cultivos con mejor emergencia y rendimiento, comparados con labranzas verticales convencionales.

A través del presente trabajo final se busca evaluar el desempeño del sistema de labranza en franjas mediante la utilización de un escarificador en la línea de siembra en la implantación y rendimiento de un cultivo de maíz. Además, poder dilucidar el efecto de esta tecnología sobre la compactación del suelo, a través del análisis de los parámetros de estudio más difundidos: densidad aparente, humedad y resistencia a la penetración.

Para abordar esos objetivos, se consideraron las siguientes hipótesis:

- El efecto disturbador del escarificador no genera diferencias en el rendimiento del cultivo de Maíz.
- El implemento escarificador en el surco de siembra no modifica la densidad aparente o la resistencia mecánica del suelo en el surco cultivado.

2. Materiales y métodos.

El ensayo se realizó en el campo experimental del Instituto de Ingeniería Rural (CNIA - INTA Castelar, provincia de Buenos Aires) sobre un suelo Argiudol Vértico. El contenido de arcilla fue de 28,5%, y el de materia orgánica del 4,6%. La clase textural es franco arcillo limoso y el relieve del área es normal.

2.1. Antecedentes del sitio

El lote proviene de 3 años de monocultivo de soja bajo siembra directa, dos años con cultivo de girasol y finalmente 2 años sin actividad agrícola, en los que se realizaron únicamente cortes periódicos de las malezas con desmalezadora.

En años anteriores se realizaron ensayos similares, aplicando la misma tecnología, con cultivos de soja (Tesouro et al., 2009 a) y girasol. En la Figura 2.1.1, se detallan los rendimientos alcanzados (datos no publicados) en un ensayo preliminar de un cultivo de maíz en el mismo lote del presente ensayo. A diferencia del experimento evaluado en este trabajo, las condiciones meteorológicas fueron muy favorables durante todo el ciclo del cultivo.

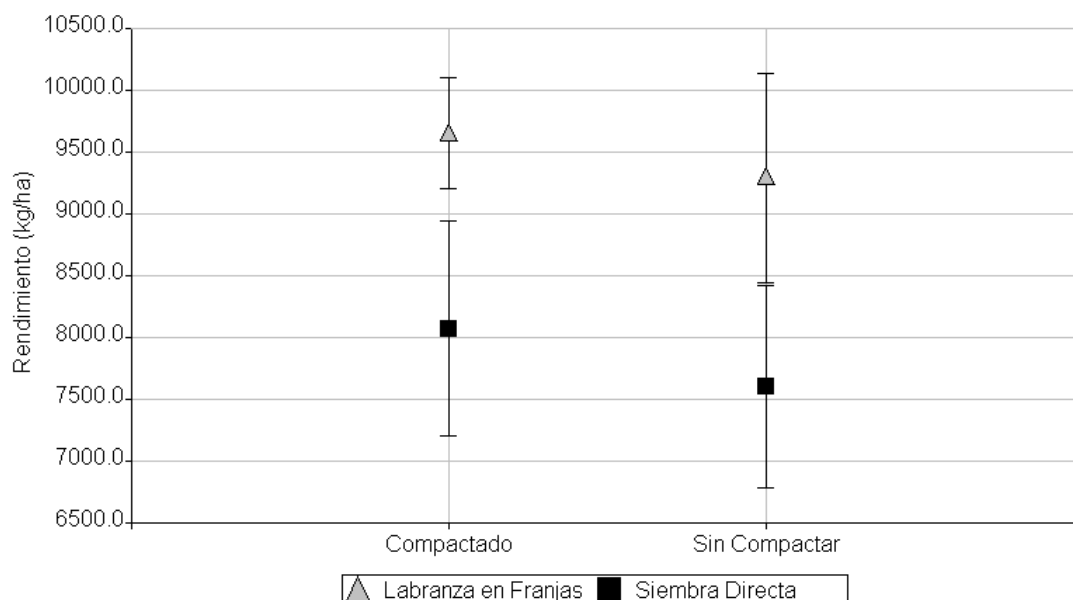


Figura 2.1.1: Valores medios de rendimiento (kg ha^{-1}) para cada tratamiento y subtratamiento. Las barras señalan el error estándar.

2.2. Registros meteorológicos

Las mediciones realizadas en el predio de Castelar por el Instituto de Clima y Agua del CNIA, se detallan en la Tabla 2.2.1. Según el informe para el sector agropecuario del Servicio Meteorológico Nacional para el período de cultivo de los maíces sembrados en el mes de diciembre 2011 en la mayor parte de la región se dieron buenas condiciones hídricas. Los maíces tardíos tuvieron un rendimiento promedio de 9098 kg ha⁻¹ para la zona núcleo, según Borrás y Gambín (2012).

La semana previa a la implantación, se contó con precipitaciones por un total de 2,1 cm, que empero no alcanzaron para satisfacer la demanda global. El valor de humedad gravimétrica al momento de la siembra fue de 26,2% (promedio todas las parcelas, de 0 a 20 cm de profundidad (Tabla 2.2.2).

Tabla 2.2.1: Datos meteorológicos de Octubre de 2011 a Abril 2012.

Mes	Temperatura media (°C)	Precipitación (mm)	ETPc	Balance
Octubre	16,2	54,1	74,0	-20,0
Noviembre	21,6	53,0	114,3	-61,3
Diciembre	22,2	26,9	131,4	-104,5
Enero	25,3	36,4	144,0	-107,6
Febrero	23,6	174,3	93,9	80,4
Marzo	20,1	100,2	69,7	30,4
Abril	16,5	50,2	48,9	1,2
Total	17,8	495,0	676,4	-181,4

Tabla 2.2.2: Humedad gravimétrica del suelo al momento de la siembra (0 a 20 cm).

Variable	Media	n	CV	Mínimo	Máximo
H%	26,2	100	9,7	20,4	33,5

Martelotto et al. (2004) determinaron los consumos de agua para maíz entre 566,2 y 759,2 mm con producciones entre 7300 y 10000 kg ha⁻¹. Considerando esas demandas, el cultivo bajo ensayo se desarrolló en un ambiente con un déficit aproximado de 130 mm. Para subsanar ese déficit, las parcelas fueron regadas en 6 oportunidades con una lámina de 36 mm, con una frecuencia semanal.

2.3. Descripción del ensayo

Con la intención de realizar la comparación entre el sistema de labranza en franjas y el sistema de siembra directa, se contrastaron los datos obtenidos con ambos sistemas en parcelas apareadas, siguiendo un diseño factorial de dos factores: situación de compactación y sistema de manejo.

El factor situación de compactación incluyó dos niveles: parcelas sin compactar y parcelas compactadas. La compactación se generó por el tránsito de un tractor con hidroyelastidad de 6125 kg de masa total. En octubre de 2011, con una humedad del suelo cercana a capacidad de campo (promedio humedad gravimétrica: 28,9%) se procedió a transitar 5 veces de manera progresiva y uniforme la totalidad de la superficie destinada al tratamiento de compactación.

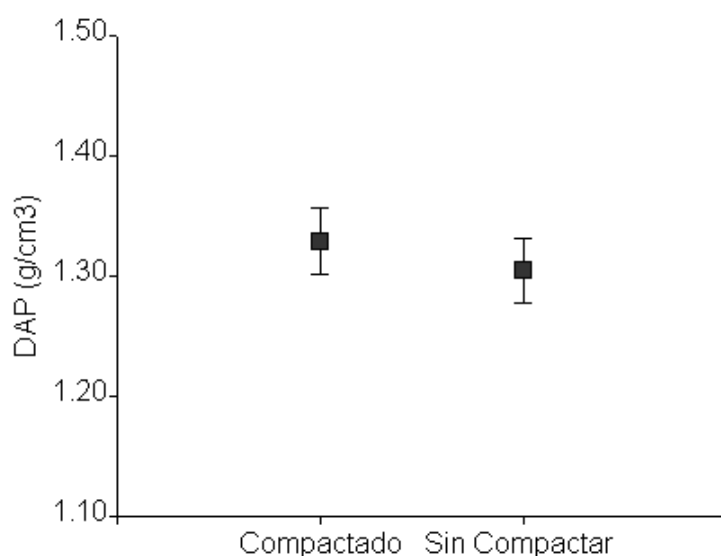


Figura 2.3.1: Valores de densidad aparente (DAP, g cm⁻³) promedios para cada tratamiento, sin separar por profundidad. Las barras representan el intervalo de confianza (95%).

A modo de control, antes de la implantación del cultivo, y por ende de la implementación de los subtratamientos, se registraron los valores de humedad, densidad aparente y resistencia a la penetración (IC). Para éste último parámetro se observaron diferencias significativas entre el tratamiento compactado y el que no fue transitado (alfa= 0,05). En las Figuras 2.3.1 y 2.3.2 se puede observar el efecto del tratamiento de compactación.

El factor sistema de manejo también contó con dos niveles, denominados subtratamientos: sistema de labranza en franjas y sistema de siembra directa.

La configuración de los trenes de siembra fue la siguiente: cuchilla labrasurco turbo con 25 ondas de 17 pulgadas de diámetro (43,18 cm), abresurco de tipo doble disco de igual diámetro de 15 pulgadas de diámetro (38,10 cm), doble rueda limitadora de profundidad, rueda apretadora de goma y ruedas cubridorras dobles con banda de goma y disco escotado. No se realizaron modificaciones ni agregados sobre el estándar comercial.

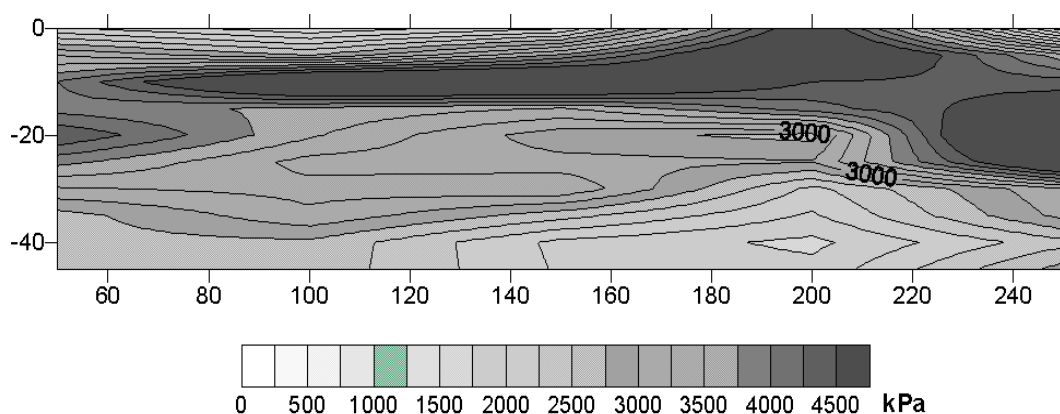


Figura 2.3.2: Mapa de resistencia a la penetración (kPa), para el tratamiento compactado previo a la implantación. Referencias: eje de abscisas, distancia transversal a los surcos (cm); eje de ordenadas, profundidad (cm).

Para realizar el tratamiento de labranza en franjas, los implementos subsoladores se montaron sobre los trenes standard en cuerpos contiguos a los de siembra directa. Con la intención de facilitar las mediciones se utilizaron los 2 primeros cuerpos de cada extremo del bastidor. El tratamiento de labranza en franjas, contó con el agregado del accesorio de escarificado (Figuras 2.3.3 y 2.3.4) que posee como órganos activos una cuchilla ondulada, un escarificador de arco rígido y dos ruedas compactadoras, vinculados mediante una pletina de 8,10 cm de longitud, 7,5 cm de ancho y 1,9 cm de espesor, con dos resortes de compensación. La cuchilla ondulada responde al diseño turbo de 18 pulgadas de diámetro y 19 ondas con 7,6 cm de período y amplitud de 1 cm, ambas dimensiones medidas en su periferia. La profundidad de este órgano, se logra por medio de una articulación regulable que posee el timón de soporte.

El escarificador consta de un arco rígido y una reja en su extremo inferior, constituyendo ambas partes una sola pieza. El arco rígido tiene una longitud de 41,5 cm, un espesor máximo de 1,9 cm en su cara posterior y un desarrollo de 6,6 cm en el sentido de la

dirección de avance. La cara anterior del arco presenta un filo romo. El ángulo de ataque es de 60 grados respecto de la horizontal. El arco posee en su parte superior una regulación de altura, con lo cual puede desplazarse en sentido vertical un máximo de 4,5 cm. En una vista en planta, la reja posee forma de triángulo isósceles de 4,7 cm de base y 7,6 cm en sus lados mayores. El espesor es de 0,5 cm y el ángulo de incidencia es de 4 grados respecto de la horizontal. Las ruedas compactadoras son rígidas, de 30 cm de diámetro. La banda de rodadura es de sección tronco-cónica y 4 cm de ancho. Poseen un ángulo de 13 grados con la vertical y de 1 grado con la dirección de avance. El brazo que vincula la rueda con la pletina posee dos articulaciones regulables, lo cual posibilita desplazarlas verticalmente y en el sentido antero-posterior. La profundidad de trabajo de las cuchillas labrasurco fue de 9 cm y a su vez los abresurcos trabajaron a 4 cm.



Figura 2.3.3: Accesorio de labranza evaluado en el ensayo. Órganos activos: (a) escarificador de arco rígido, (b) cuchilla labrasurco; órganos de fijación del conjunto: (d) brazo regulable porta cuchilla, (e) brida de anclaje, (g) bastidor; (f) ruedas tapadoras/compactadoras y (c) resortes de compensación

La siembra del cultivo de maíz se realizó sobre barbecho químico. Para la siembra se utilizó una máquina sembradora para siembra directa marca *Schiarre*, modelo *SDX Tekno 2500*. La velocidad de trabajo fue de 6 km h^{-1} , en pasadas perpendiculares a la pendiente,

de 20 metros de longitud. Para reducir el efecto de la desuniformidad de siembra debido al funcionamiento de los trenes en cuanto a profundidad y distribución; se decidió realizar una siembra manual sobre los surcos generados por la sembradora con ambos sistemas de implantación. Para tal fin, en diciembre, se utilizaron unos conos de 4 cm, con los cuales se realizó la siembra del grano de maíz a una distancia regular de 15,4 cm, obteniendo una densidad de 6,5 semillas por metro lineal, con una distancia entre surcos de 70 cm. Al finalizar la siembra, se protegieron todos los surcos con mallas metálicas para evitar el daño por pájaros y liebres (Figura 3.1.1).

Con el fin de reducir el error experimental y la variabilidad ambiental, las parcelas con los diferentes tratamientos se realizaron próximas entre sí. Cada repetición consta de 8 surcos individualizados y apareados.



Figura 2.3.4: Detalle del accesorio de labranza evaluado en el ensayo en posición de trabajo.

2.4. Recolección, determinación y análisis de datos

Se realizaron las siguientes mediciones:

Plantas logradas: Para cada uno de los tratamientos y repeticiones se identificaron los surcos a evaluar, de 10 m de largo. Sobre estos surcos se contaron las plantas resultantes a los 7, 10, 14 y 20 días posteriores a la implantación. Con estos datos se calculó la *Eficiencia*

de Implantación (Ei) relacionando el número de plantas por metro de surco (pl m^{-1}) de la población final lograda, con la población objetivo.

Rendimiento: Sobre esos mismos segmentos de surco, para cada tratamiento y cada repetición se cosecharon los marlos y se midió el rendimiento en grano de cada surco.

Resistencia a la penetración: Se determinó el grado de resistencia a la penetración del suelo, previo y posterior al cultivo. Para ello se utilizó un penetrómetro estandarizado: ASAE Standard S.313. (1992). Se efectuaron 3 transectas perpendiculares a los surcos, y se realizaron mediciones a los 35, 15 y 0 cm desde el centro del surco. Se realizaron las mediciones en el mes de julio, de 0 a 45 cm de profundidad y a intervalos consecutivos de 5 cm.

Densidad aparente: Se determinó este parámetro mediante cilindros metálicos de volumen conocido, realizando mediciones en los intervalos de 0 a 5, 5 a 10, 10 a 15 y 15 a 20 cm de profundidad. Debido a las características texturales y mineralógicas del suelo donde se realizó el ensayo y teniendo en cuenta que este parámetro resulta sustancialmente afectado por el contenido de humedad del suelo, la densidad aparente se calculó en base al volumen que ocupa la muestra de suelo luego de ser mantenida a 105°C hasta constancia de peso. Las muestras fueron obtenidas en el surco. El muestreo fue realizado en el mes de junio, dos meses posteriores a la cosecha.

Humedad Gravimétrica: Se determinó el contenido de humedad gravimétrica expresado como porcentaje sobre suelo seco a partir de la diferencia entre las muestras en húmedo y luego secadas a estufa a 105°C . Este parámetro se obtuvo tanto a partir de las muestras de densidad aparente (junio 2012), como con barreno al momento de realizar las mediciones de resistencia a la penetración (julio 2012). En el segundo caso, el muestreo de humedad fue realizado hasta los 45 cm.

2.5. Análisis estadísticos

En todos los casos, los sitios muestrales fueron elegidos al azar, utilizando el método de coordenadas. Luego se realizaron análisis de varianza convencionales de las variables medidas para determinar el efecto de los tratamientos y, cuando se consideraron pertinentes, los contrastes ortogonales prefijados con el paquete estadístico *InfoStat* (2007). Se realizaron tests de comparación de medias cuando los valores de F eran significativos, según LSD-Tukey con el paquete estadístico *InfoStat*. En ninguno de los casos analizados se observaron inconvenientes en el control de los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas, cumpliéndose todos ellos ($\alpha=0,05$).

3. Resultados y Discusión

3.1. Implantación

Los valores de plantas por metro (pl m^{-1}), y por ende los de eficiencia de implantación, variaron dependiendo de si recibieron el tratamiento de compactación y si se utilizó el sistema de labranza en franjas, siendo el tratamiento con labranza en franjas el que mejores valores alcanzó (Tabla 3.1.1), aunque no alcanzaran diferencias estadísticamente significativas. En el análisis de este parámetro no se hallaron interacciones estadísticas entre los factores ($\alpha=0,05$). Por otra parte, los valores de eficiencia medios de implantación encontrados en ambos sistemas ($E_i = 0,63$), superan la media encontrada en la zona núcleo en una encuesta realizada en el año 2007 por Tesouro et al. (2009 b). Cabe destacar, que para todos los tratamientos, en un lapso de 14 días posteriores a la implantación se alcanzó la población final.

Tabla 3.1.1.: Estadística descriptiva de la variable Plantas por metro (pl m^{-1}) para cada combinación tratamiento y subtratamiento.

Variable		Media	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	n
pl m^{-1}		4,88	0,75	17,8	3,21	6,41	24
Tratamiento	Subtratamiento	Media	Var(n-1)	CV	Mín	Máx	n
C	SD	4,98 a	0,89	19,00	3,56	6,20	6
C	LF	5,02 a	0,47	13,62	4,47	6,36	6
SC	SD	4,23 a	1,04	24,12	3,21	5,77	6
SC	LF	5,28 a	0,33	10,85	4,84	6,41	6

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Diferencia mínima significativa= 1.08934 Error: 0.4545 Grados de libertad: 20

Referencias: C: compactado, SC: sin compactar, SD: Siembra Directa, LF: Labranza en Franjas, CV: Coeficiente de variación.

Trevini et al. (2013) señalan que la labranza en franjas con dientes angostos y ruedas cubridorras posteriores, prepara el surco de siembra de manera equivalente a las condiciones de mínima labranza, manteniendo la cobertura. Además encontraron diferencias estadísticas en la eficiencia de implantación de plantas de maíz y soja a favor de la labranza en franjas, contrariamente a lo hallado en este ensayo.

Tabla 3.1.2.: Valores medios de Eficiencia de implantación (Ei) para cada combinación tratamiento y subtratamiento.

Variable:		Eficiencia de implantación (Ei)	
Tratamiento	Subtratamiento	Medias	n
SC	SD	0,71	6 A
C	LF	0,77	6 A
C	SD	0,80	6 A
SC	LF	0,81	6 A

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)
DMS:=0,16899 Error: 0,0109 gl: 20

Referencias: C: compactado, SC: sin compactar, SD: Siembra Directa, LF: Labranza en Franjas, CV: Coeficiente de variación.



Figura 3.1.1: Vista en detalle del sitio experimental, día 14 después de la implantación. Luego de la siembra los surcos fueron cubiertos a modo de protección.

3.2. Densidad Aparente

Se encontraron diferencias significativas en la densidad aparente promedio del suelo por efecto del tratamiento de compactación y el sistema de labranza, no se observaron interacciones entre los factores (valor-p=0,064). En la Figura 3.2.1 se puede observar como el subtratamiento de labranza en franjas redujo los valores de densidad respecto al subtratamiento de siembra directa, ya sea en las parcelas compactadas o en las parcelas sin compactar.

Dicha disparidad por el efecto del sistema de labranza es estadísticamente significativa (alfa= 0,05), siendo el tratamiento con labranza en el surco de siembra el de menor promedio. Este comportamiento concuerda con las tendencias expuestas por Trevini et al (2013) en base a datos obtenidos en un ensayo realizado en un suelo franco arenoso.

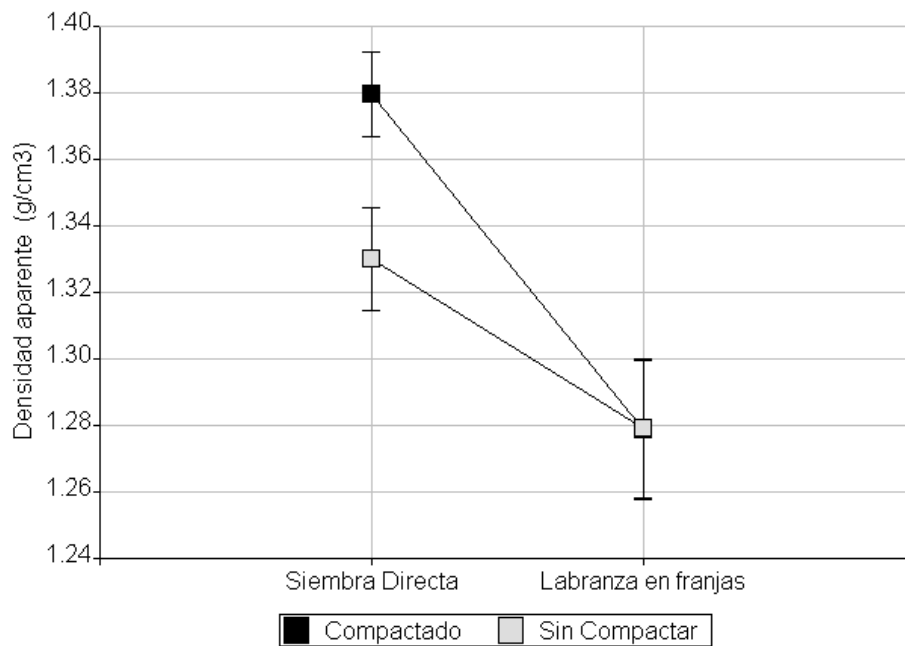


Figura 3.2.1: Valores medios de densidad aparente (DAP, g cm⁻³) para cada tratamiento de labranza, sin separar por profundidad. Las barras representan el error estándar (95%).

Se realizó un contraste ortogonal prefijado entre el tratamiento con labranza en franjas y el de siembra directa, se encontró que para las parcelas compactadas la diferencia en densidad aparente fue estadísticamente significativa ($\alpha=0,05$) mientras que para las parcelas sin compactar no se encontraron diferencias estadísticas ($\alpha=0,05$).

Al determinar la influencia de los tratamientos de compactación y labranza en las diferentes profundidades, se encontró que las diferencias son estadísticamente significativas en los primeros 15 cm del perfil (Figura 3.2.2). En el mismo análisis, se destaca que en las parcelas compactadas la tendencia es que los valores de densidad aparente del suelo son menores para el manejo con labranza en franjas, este comportamiento se registró en todos los intervalos, incluso a los 20 cm de profundidad. Cuando las parcelas no fueron compactadas, no hubo diferencias significativas entre los tratamientos de labranza en todo el perfil explorado.

Tabla 3.2.1: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del sistema de labranza para cada tratamiento de compactación sobre la densidad aparente media.

Contraste	Grado de libertad	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
LF vs D en C	1	0,18	15,66	0,0001
LF vs D en SC	1	0,05	4,20	0,0423

Referencias: LF, tratamiento de labranza en franjas; D, tratamiento de siembra directa; C, tratamiento compactado; SC, tratamiento sin compactar

La densidad aparente es uno de los parámetros más frecuentemente utilizados para determinar la compactación del suelo. Sin embargo, en suelos no alterados, el cambio en la densidad aparente ante elevadas presiones ejercidas en superficie, es relativamente pequeño (Morgan et al., 1993). Esta afirmación, podría estar explicando la poca diferencia nominal encontrada entre las parcelas con labranza en franjas o en siembra directa del presente ensayo. La labranza en franjas tuvo un marcado efecto sobre la densidad aparente hasta los 15 cm de profundidad (Tabla 3.2.2)

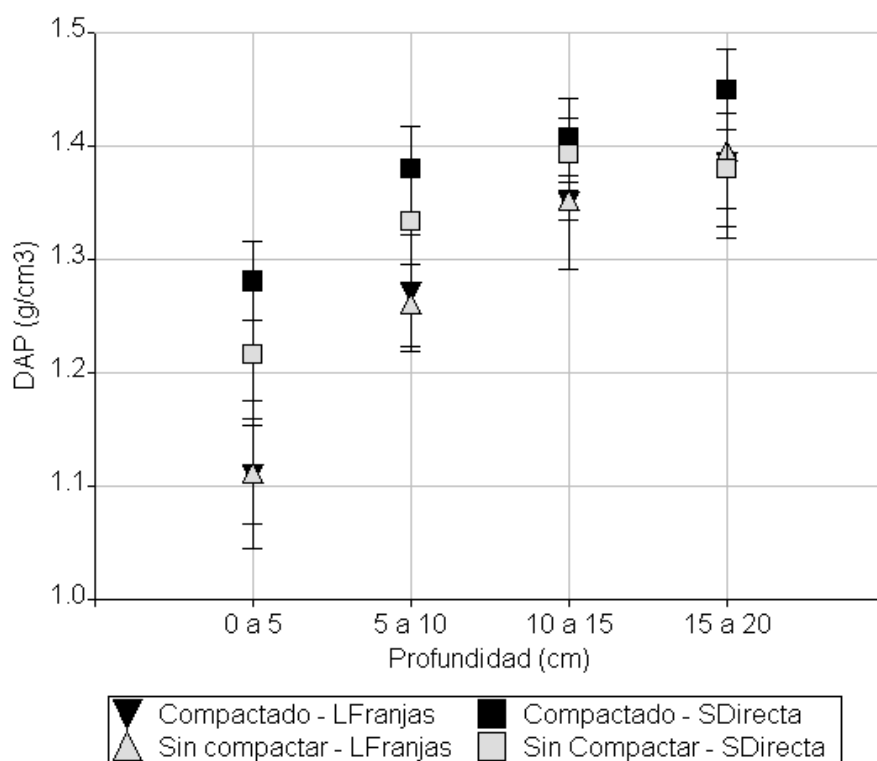


Figura 3.2.2: Valores medios de DAP (g cm^{-3}) discriminada para cada tratamiento y subtratamiento, según profundidad. Las barras representan el intervalo de confianza (95%).

Referencias: Cuadrados, tratamiento compactado; Triángulos, tratamiento sin compactar; en color rojo Siembra Directa; en color amarillo, Labranza en franjas en la línea de siembra.

Tabla 3.2.2: Análisis de la varianza de la variable DAP (g cm^{-3}) para las distintas combinaciones de tratamientos, observadas para cada profundidad.

Resumen Profundidades - Valores p - DAP

Análisis de la Varianza (SC tipo III) (alfa=0,05)

Fuente de variación	Intervalos de profundidad (cm)			
	0 a 5	5 a 10	10 a 15	15 a 20
Modelo	<0,0001	0,0004	0,1200	0,0849
Tratamiento Compactación	0,1527	0,1520	0,9354	0,0926
Subtratamiento Labranza	<0,0001	0,0001	0,0258	0,1528
Tratamiento*Subtratamiento	0,1513	0,3692	0,3721	0,1583

3.3. Resistencia a la penetración

Se encontró que los efectos de los tratamientos de compactación y el método de surcado (alfa=0,05) sobre la resistencia a la penetración o *índice de cono* fueron significativos en todas las distancias y profundidades. Además, sin discriminar por profundidad, se encontraron diferencias significativas entre las mediciones según fueran realizadas en el surco o en el entresurco (alfa=0,05).

En cuanto a las diferencias discriminando en función de la profundidad no fueron significativas ni dentro de cada tratamiento, ni los subtratamientos, ni en el surco ni los entresurcos (alfa=0,05). Dos situaciones excepcionales se observan en el surco de siembra a los 10 y 20 cm, resultando en ambos casos menor la resistencia en el sistema de labranza en franjas que la siembra directa en las parcelas compactadas (alfa=0,05; Tabla 3.3.1).

El promedio general del índice de cono para el tratamiento compactado (las tres distancias y de 0 a 45 cm) fue de 2145,98 kPa y, como era de esperarse, el tratamiento sin compactar fue menor, de 1958,04 kPa. Al analizar la respuesta obtenida por el método de surcado para cada uno de los tratamientos, se encontró que el sistema de labranza en franjas en la línea de siembra redujo la resistencia del suelo, pero esa diferencia fue significativa sólo en las parcelas con el tratamiento de compactación (Tabla 3.3.2, Figura 3.3.2).

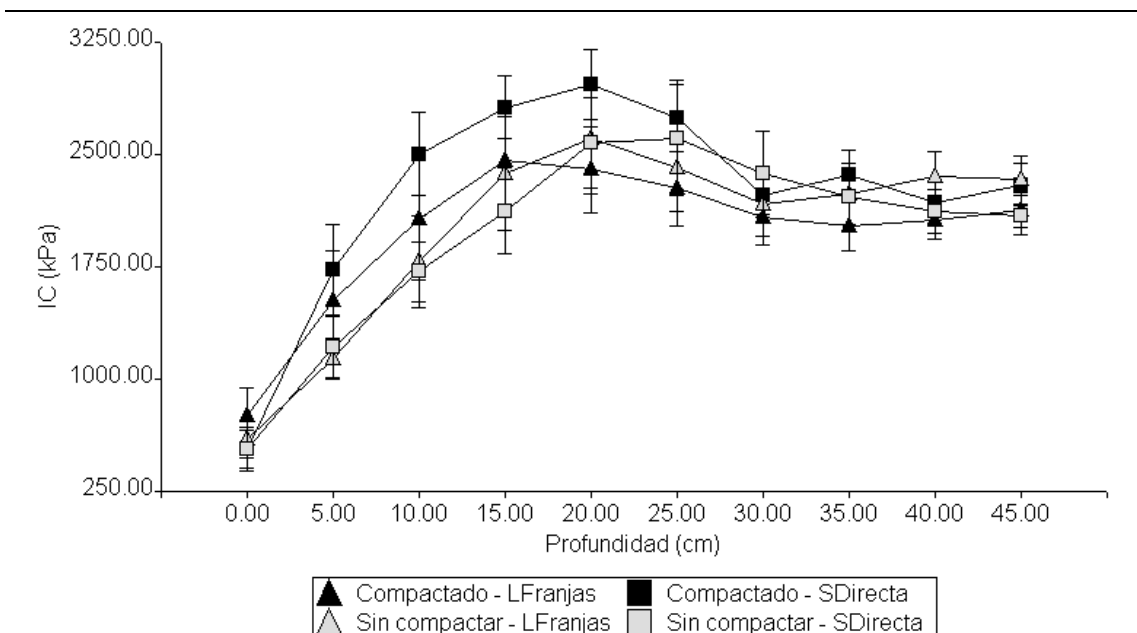


Figura 3.3.1: Valores medios de resistencia a la penetración (IC, kPa) en el surco, por profundidad, discriminada para cada tratamiento y subtratamiento. Las barras representan el intervalo de confianza (95%).

Tabla 3.3.1: Resistencia a la penetración media (kPa) y su coeficiente de variación (CV %) para las distintas combinaciones de tratamientos, separadas por profundidad. En el surco de siembra.

Profundidad	Tratamiento	Subtratamiento	Media (kPa)	CV
0	C	LF	456,50	a 32,13
		SD	262,83	a 74,16
	SC	LF	417,92	a 51
		SD	456,83	a 47,83
5	C	LF	892,00	a 39,46
		SD	1371,75	a 49,45
	SC	LF	851,00	a 39,45
		SD	1117,25	a 43,82
10	C	LF	1366,17	a 39,83
		SD	2234,83	b 41,13
	SC	LF	1117,25	a 38,4
		SD	1611,75	ab 27,24
15	C	LF	2162,00	a 41,23
		SD	2471,83	a 18,87
	SC	LF	2150,17	a 42,86
		SD	2252,58	a 29,74
20	C	LF	2082,83	a 30,85
		SD	3160,92	b 29,23
	SC	LF	2364,42	ab 38,37
		SD	2665,17	ab 37,49
25	C	LF	1857,58	a 36,61
		SD	2580,25	a 25,32
	SC	LF	2205,67	a 27,7
		SD	2687,08	a 48,48
30	C	LF	1813,58	a 30,16
		SD	2138,33	a 18,64
	SC	LF	2012,67	a 29,3
		SD	2463,67	a 40,97
35	C	LF	1793,50	a 29,56
		SD	2258,42	a 27,15
	SC	LF	1995,08	a 26,48
		SD	2132,58	a 19,69
40	C	LF	2018,50	a 21,68
		SD	2123,83	a 19,92
	SC	LF	2154,92	a 18,4
		SD	2088,67	a 16,71
45	C	LF	2009,58	a 12,35
		SD	2246,83	a 19,89
	SC	LF	2097,33	a 14,06
		SD	2123,67	a 12,53

Referencias: LF, tratamiento de labranza en franjas; D, tratamiento de siembra directa; C, tratamiento compactado; SC, tratamiento sin compactar. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Tabla 3.3.2: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del Tratamiento, Subtratamientos y sus interacciones sobre la resistencia a la penetración media (kPa), para las tres distancias al surco y promediando cada perfil (0 a 45 cm).

	Distancia al surco			F	Valor-p	
	0	15	35			
Tratamiento						
SC	1848,28 aA	1992,38 bA	2096,45 cA	25,93	<0,0001	
C	1865,10 aA	2078,47 bA	2376,65 cB	7,59	0,0059	
F	0,04	1,22	10,18			
Valor-p	0,8343	0,2708	0,0015			
Subtratamiento						
LF	1690,93 aA	1994,51 bA	2280,4 cA	13,64	0,0002	
SD	2022,45 aB	2076,34 aA	2192,6 aA	0,43	0,5121	
F	17,02	1,1	1			
Valor-p	<0,0001	0,2951	0,3174			
Interacción Tratamiento*Subtratamiento						
C	LF	1645,23 a	1954,68 b	2332,29 c	24,5	<0,0001
SC	LF	1736,64 a	2034,33 b	2228,69 b	15,39	0,0001
SC	SD	1959,93 a	1950,43 a	1964,2 a	0,00067	0,9793
C	SD	2084,98 a	2202,25 b	2421,02 b	5,07	0,0245
F		1,81	4,51	4,05		
Valor-p		0,1787	0,0343	0,0448		

Referencias: LF, Labranza en franjas; SD, Siembra Directa; 0, surco; 15 y 35 distancias al surco. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0.05$)

Tabla 3.3.3: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del sistema de labranza para cada tratamiento de compactación sobre la resistencia a la penetración en el surco de siembra. Interacciones. Promedio de cada perfil (0 a 45 cm).

Contraste	Grado de libertad	Contraste SS	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
LF vs SD en C	1	10416870,87	10416870,87	9,07	0,0029
LF vs SD en SC	1	444240,82	444240,82	0,39	0,5345

Referencias: LF, tratamiento de labranza en franjas; D, tratamiento de siembra directa; C, tratamiento compactado; SC, tratamiento sin compactar

Además, promediando todas las profundidades se encontraron diferencias significativas entre las mediciones según fueran realizadas en el surco o en el entresurco ($\alpha=0,05$). Así mismo, al analizar los efectos dentro de cada tratamiento de compactación (Tabla 3.3.3), se encontró que para la situación sin compactar, no se encontraron diferencias por efecto del tipo de surcado entre las mediciones realizadas en el surco contrastadas con las realizadas a los 15 cm del surco, ni respecto del entresurco sin modificar (testigo). Por el

contrario, y como puede observarse en la Tabla 3.3.4, al analizar los efectos en las parcelas previamente compactadas se encontró que, comparando las mediciones realizadas en el surco, a los 15 cm y el entresurco, se hallaron diferencias significativas. Y al comparar ambos métodos, el nivel de significancia alcanzó un valor mayor al 95% de probabilidad, mientras que al comparar los entresurcos, no se encontraron diferencias.

Tabla 3.3.4: Contrastes ortogonales del efecto del método de surcado en las parcelas compactadas sobre la resistencia a la penetración. Promedio de cada perfil (0 a 45 cm).

Variable dependiente: índice de cono			
Tratamiento	Contraste	Valor t	Pr > t
C	LF en 0 vs. LF 15	2,2803	0,0235
C	LF en 0 vs. LF 35	4,7844	<0,0001
C	LF en 15 vs. LF en 35	3,0484	0,0026
C	LF en 0 vs. SD en 0	3,4526	0,0007
C	LF en 35 vs. SD en 35	0,4223	0,6731

Referencias: LF, Labranza en franjas; SD, Siembra Directa; 0, surco; 15 y 35 distancias al surco en cm.

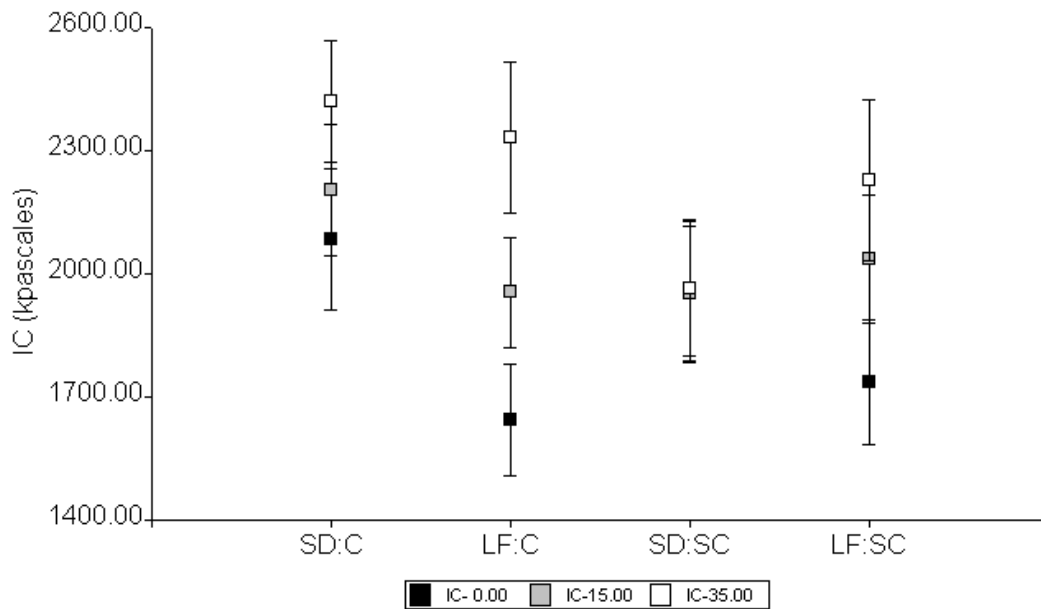


Figura 3.3.2: Valores medios de resistencia a la penetración (IC) (kPa) discriminada para cada tratamiento y subtratamiento, según posición en la transecta. Las barras representan el intervalo de confianza (95%). Referencias: 0, surco; 15 y 35 distancias al surco.

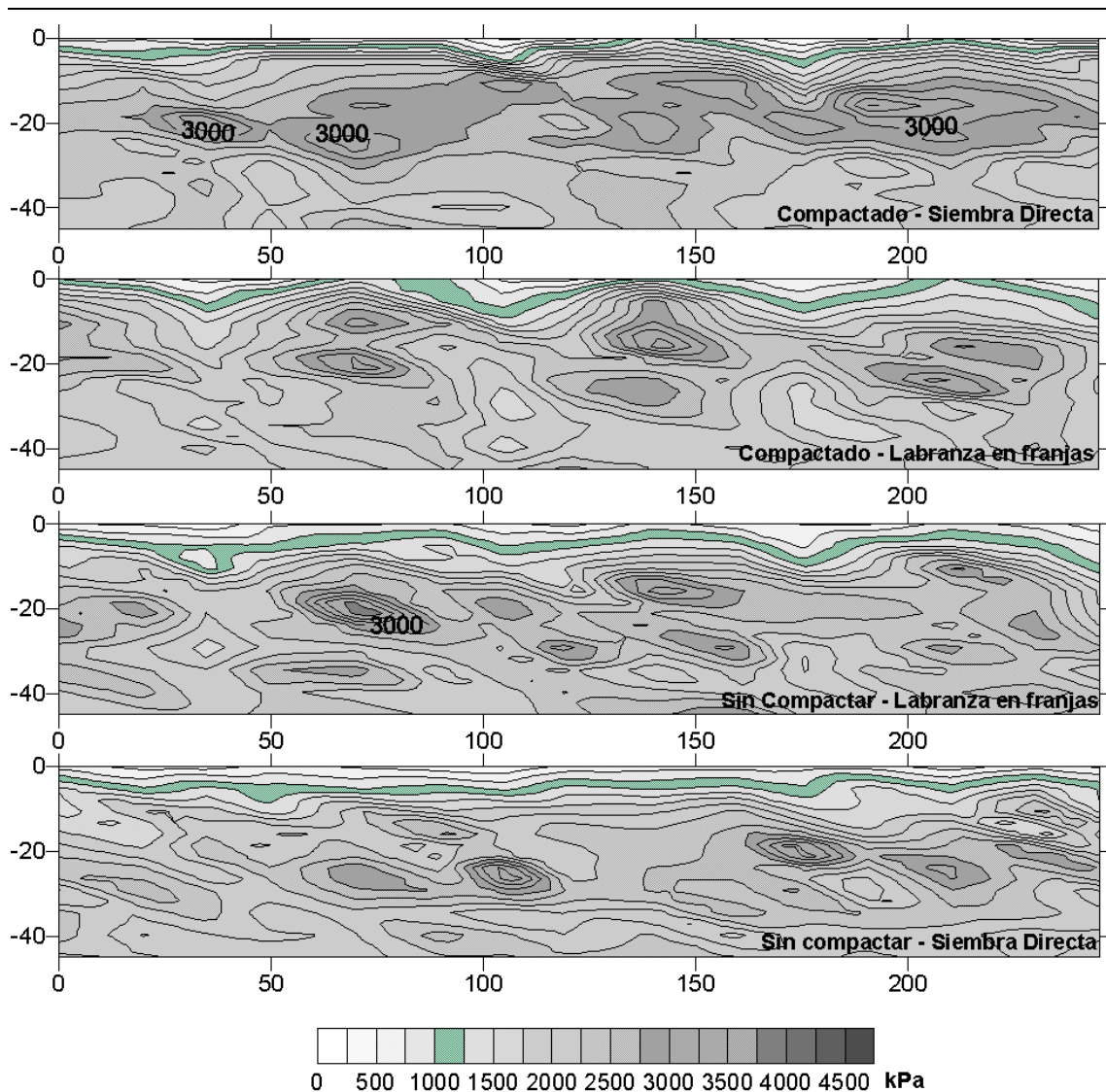


Figura 3.3.3: Mapas de resistencia a la penetración (kPa), para cada tratamiento y subtratamiento. Referencias: eje de abscisas, distancia transversal a los surcos; eje de ordenadas, profundidad.

En la Figura 3.3.1 se puede observar que el efecto del sistema de labranza en franjas en el surco es evidente tanto en las parcelas compactadas como en las sin compactar. Por debajo de la profundidad de trabajo (18 - 20 cm) la influencia del tratamiento tiene una mayor incidencia en las parcelas compactadas.

Al comparar los mapas de resistencias (Figura 3.3.3) de las parcelas compactadas con las parcelas sin compactar, podemos corroborar que existe una capa endurecida entre los 10 y los 30 cm de profundidad alcanzando valores de superiores a los 3000 kPa en las compactadas, mientras que en las restantes las zonas endurecidas son discontinuas y con un nivel menor a 3000 kPa. En ambos casos, el sistema de labranza en franjas en la línea

de siembra redujo los valores de resistencia, siendo la diferencia más notable en las parcelas compactadas. Además, se puede observar las diferencias encontradas en los análisis de varianzas. En los perfiles de las parcelas con el sistema de labranza en franjas se pueden identificar los surcos y la influencia en profundidad del escarificador.

Contrariamente a lo expuesto por Afzalnia y Zabihi (2014) quienes encontraron que, en un suelo franco arcillo limoso, tanto el índice de cono como la densidad aparente, tuvieron un menor efecto al ser medidos al final del cultivo; en el presente estudio se pudieron observar los efectos del tratamiento de compactación a un año de su realización y luego de todo el ciclo de cultivo. Esos mismos autores sólo encontraron efectos estadísticos al analizar las mediciones realizadas durante el comienzo del mismo. Ante esta situación, especulan que dicha diferencia es debida a la influencia del desarrollo radical del maíz. Los datos expuestos en este trabajo plantean una diferencia con dicha afirmación. Puede observarse en los mapas de isoresistencia (Figura 3.3.3) que el tratamiento compactado, si bien ha reducido los valores iniciales, es claramente visible cuando no se aplicó el sistema de labranza en franjas, aún un año después de la aplicación del tratamiento.

Estudios realizados por Gupta et al. (1990) muestran que los valores de resistencia, determinados con el penetrómetro, en los cuales es afectado seriamente el desarrollo radicular varía según el tipo de suelo y la especie cultivada. Según lo expuesto por Lipiec y Hatano (2003), en un ensayo realizado sobre un suelo franco arcilloso, el desarrollo radical del maíz se ve interrumpido cuando los valores de resistencia se encuentran en un rango de 3000 a 4000 kPa. Estos autores afirman coincidir con Stenitzer (1988) que señaló ese mismo rango crítico. Stenitzer (1988) fue quien además encontró que los valores que causan el inicio de la reducción en el crecimiento radical, se encuentran entre 1000 y 1700 kPa. En este sentido y relacionando la resistencia mecánica a la penetración con el resultado del cultivo de maíz, encontramos que el efecto de la compactación podría relacionarse con una modificación perjudicial en el desarrollo radicular y una consiguiente caída en el rendimiento observado.

3.4. Humedad gravimétrica

En cuanto a las muestras en el intervalo de 0 a 20 cm del perfil (Figura 3.4.1), no se encontraron diferencias estadísticas entre tratamientos, subtratamientos, o su interacción, en ninguno de los estratos del perfil del suelo ($\alpha=0,05$). Del análisis entre profundidades, surge que el horizonte comprendido entre 0 y 5 centímetros, difiere significativamente del resto ($\alpha=0,05$).

Para el caso de las determinaciones de humedad gravimétrica al momento de realizar las mediciones de resistencia a la penetración, los resultados variaron ligeramente de los encontrados en los primeros 20 centímetros del perfil. Se encontraron diferencias significativas entre los intervalos de profundidad y también en los tratamientos (Figura 3.4.2 y 3.4.3), siendo las parcelas que recibieron el tratamiento de compactación las que presentaron mayor contenido de agua en un promedio general de 1,14 puntos. La diferencia mínima significativa fue de 0.76 ($\alpha=0,05$).

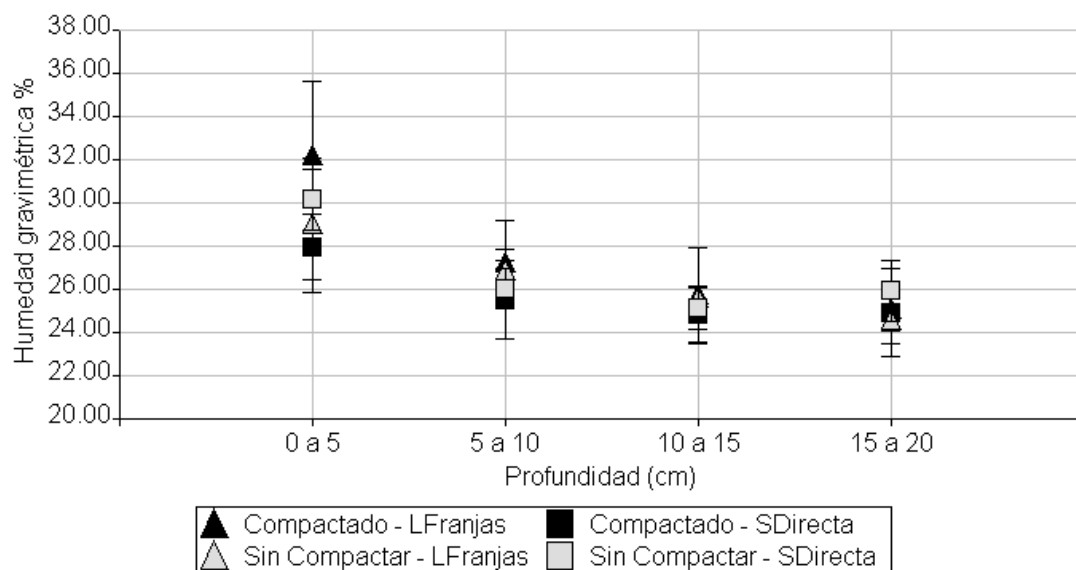


Figura 3.4.1: Valores medios de humedad gravimétrica (%) en el surco por profundidad, para cada tratamiento y subtratamiento. Las barras representan el intervalo de confianza (95%).

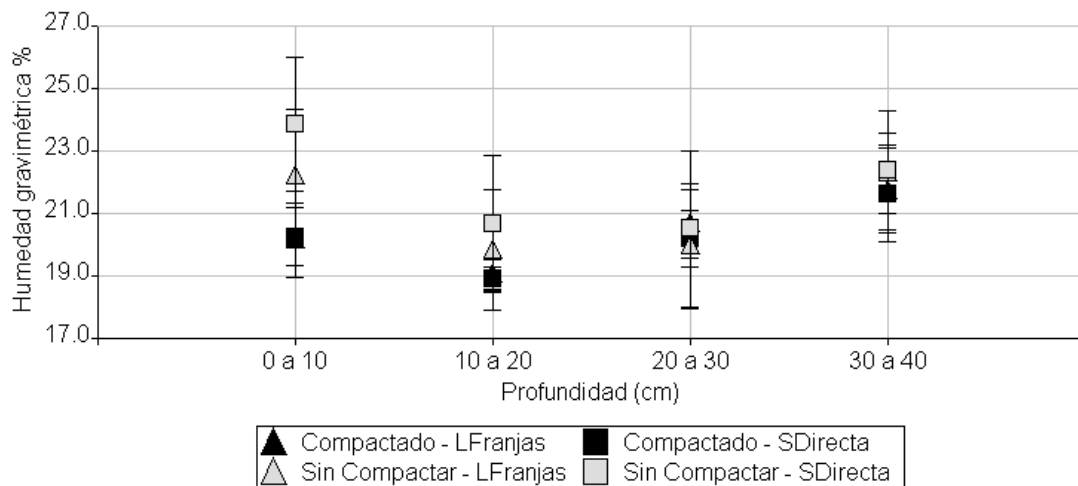


Figura 3.4.2: Valores medios de humedad gravimétrica (%) por profundidad, para cada tratamiento y subtratamiento. Las barras representan el intervalo de confianza (95%). Promedio de cada sitio de muestreo.

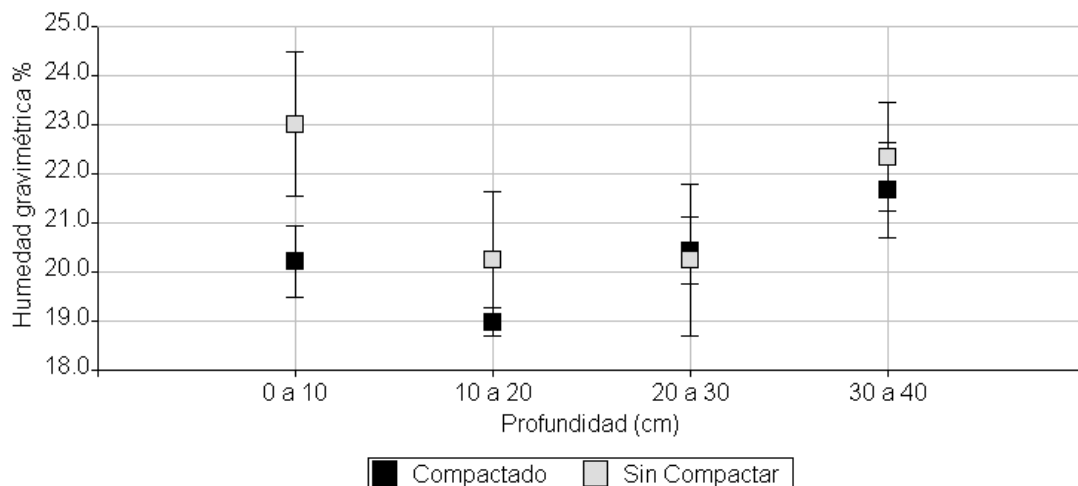


Figura 3.4.3: Valores medios de humedad gravimétrica (%) por profundidad, para cada tratamiento. Las barras representan el intervalo de confianza (95%). Promedio de cada sitio de muestreo.

La interacción entre la profundidad y el sistema de manejo fue significativa ($\alpha=0,05$). Por debajo de los 20 cm, la influencia de la herramienta de labranza en franjas no se diferencia del sistema de siembra directa, claramente en concordancia con la profundidad de trabajo y el efecto de remoción normal de una púa con estas características.

3.5. Rendimiento

Las parcelas compactadas alcanzaron un rendimiento estadísticamente mayor a las parcelas sin compactar (valor $p=0,003$) (Figura 3.5.1 y Tabla 3.5.1). En el área compactada se hallaron 7080 kg ha^{-1} y en las parcelas que no fueron compactadas el rendimiento alcanzó los 5320 kg ha^{-1} . El sistema de labranza en franjas presentó un rendimiento de 6919 kg ha^{-1} mientras que la siembra directa el valor fue de 5481 kg ha^{-1} . En suelos arcillosos, este comportamiento fue descrito por varios autores. Por ejemplo, Schuler y Wood (1992), Béyard et al. (1997) y Bicki y Siemens (1991) encontraron que los rendimientos, tanto en el maíz como en la soja, respondieron positivamente a la compactación por tránsito cuando las precipitaciones resultaron limitantes y negativamente cuando las mismas resultaron adecuadas.

A diferencia de lo ocurrido en este experimento, donde las parcelas compactadas presentaron mayores y significativos rendimientos que las parcelas sin compactar, los especialistas en tránsito y compactación, Al-Adawi y Reeder (1996), encontraron que sobre un suelo de textura fina a moderadamente fina y con tres tratamientos de compactación por tránsito (0, 9 y 18 tn de peso por eje), la compactación provocó la mayor pérdida de producción en un buen año, con abundantes precipitaciones, en el que se obtuvieron en general elevados rindes, considerando que la pérdida de producción en las parcelas densificadas fue provocada por una baja tasa de infiltración; lo cual ocasionó que el agua se mantuviera sobre la superficie del suelo, limitando la difusión de gases y el desarrollo de las plantas.

En las experiencias realizadas, las parcelas compactadas no presentaron pérdidas de rendimiento, ni en los ensayos preliminares con mejor disponibilidad hídrica, ni con el déficit observado en el presente ensayo. La compactación afecta el desarrollo y crecimiento de los cultivos en forma más importante, cuando no hay otros factores limitantes tales como disponibilidad de agua y nutrientes (Al Adawi y Reeder, 1996). En una investigación similar al presente ensayo, aunque en distintas condiciones de humedad, Gaultney et al. (1982) informaron que compactaciones del subsuelo severas en veranos relativamente húmedos, provocaron reducciones en el rinde de maíz de alrededor del 50 %, mientras que con subsuelos moderadamente compactados las mismas alcanzaron al 25 %; en ciclos con menores precipitaciones en ambos casos las mermas fueron del orden del 25%.

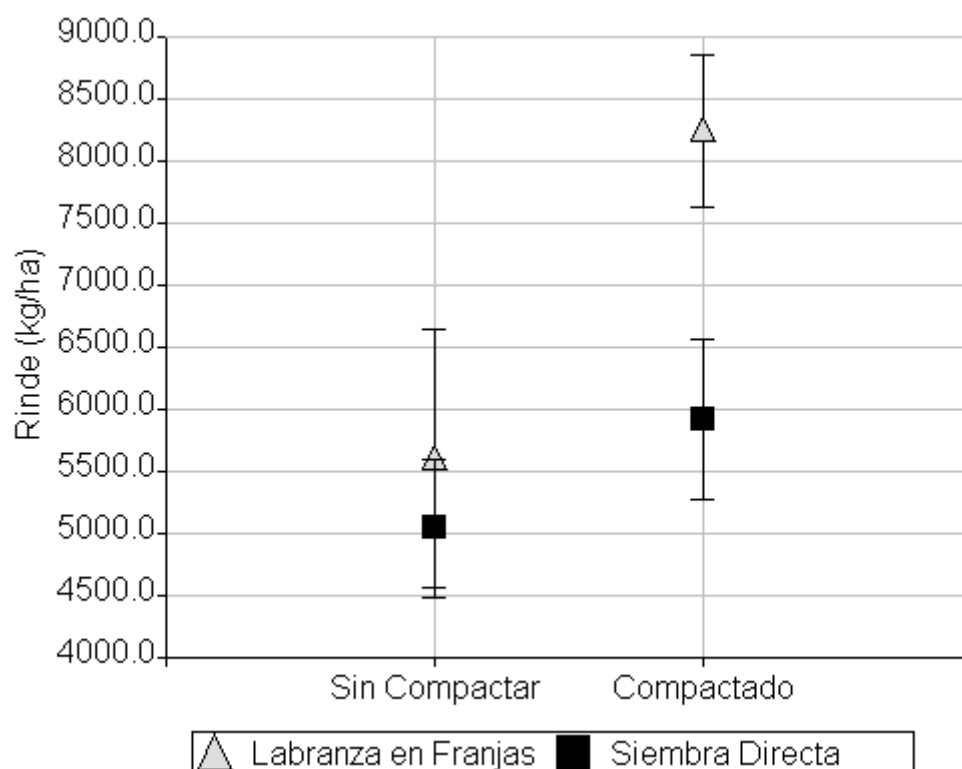


Figura 3.5.1: Valores medios de rendimiento (kg ha^{-1}) para los tratamientos de compactación y sistema de labranza. Las barras representan el error estándar.

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Tabla 3.5.1: Rendimiento medio del cultivo de maíz (kg ha^{-1}) para los distintos tratamientos aplicados.

Tratamiento	Subtratamiento		Total por Tratamiento
	Labranza en Franjas	Siembra Directa	
Compactado	8239,23 B	5922,14 A	7080,68 a
Sin Compactar	5598,93 A	5041,09 A	5320,01 b
Total por Subtratamiento	6919,08 a	5481,61 b	6200,34

Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$)

Se encontraron diferencias estadísticas en el rendimiento entre el tratamiento de Labranza en franjas y el tratamiento de siembra directa (valor $p=0,001$). Los rendimientos hallados contradicen los resultados obtenidos por Licht y Al-Kaisi (2005) quienes concluyeron que la labranza en franjas no tiene efectos significativos incrementando el rendimiento del cultivo de maíz, materia seca, asimilación de N en planta y grano, y eficiencia en el uso del agua, en comparación con labranza con arado de cincel y la no labranza.

Los rendimientos obtenidos en este ensayo podrían ser explicados a través de la sensibilidad a diferentes niveles de compactación del suelo el crecimiento y rendimiento que presenta el cultivo de maíz (Filipovic et al., 2006; Grzesiak et al., 2013), dado que los suelos compactados generan un menor desarrollo de los sistemas radicales con su consecuente reducción en el crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz (Baker et al., 1996).

En el tratamiento SC, aunque sin diferencia estadística, presentan más densidad de plantas (pl m^{-1}) las parcelas con labranza en franjas que las parcelas implantadas con siembra directa. Según Grzesiak et al. (2013) el desarrollo de las plántulas se ve afectado por la compactación del suelo desde los primeros estadios presentando un menor desarrollo radical y consiguiente reducción de la parte vegetativa. Esta diferencia podría afectar el rendimiento de los cultivos de maíz, sobre todo en situaciones con déficit hídrico (Håkansson et al., 1988).

Las interacciones entre los factores no tuvieron peso estadístico en el rendimiento del cultivo ($\alpha=0,05$). Sin embargo, comparando el efecto del factor sistema de manejo entre las parcelas compactadas y las sin compactar mediante contrastes ortogonales prefijados (Tabla 3.5.2) se evidenció la ausencia de diferencias en siembra directa, mientras que para el sistema de labranza en franjas la diferencia es significativa ($\alpha=0,05$).

Los resultados expuestos en este ensayo coinciden con los presentados por Morrison (2002) en un trabajo sobre dos suelos vertisoles, uno más arcilloso y otro más limoso, se encontró que la técnica de labranza en franjas tuvo un mejor desempeño, en cuanto al crecimiento y rendimiento del cultivo de maíz, que la siembra sin labranza. En su trabajo de 1991, Bicki y Siemens señalaron además que la labor de subsolado mejoró el rendimiento en ciclos de cultivo con adecuado contenido de humedad y deprimió el rendimiento en condiciones de sequía.

Pensando en el tránsito controlado, Hares y Novak (1992) señalan que, cuando se aplica la tecnología de la labranza en franjas, aproximadamente tres cuartas partes de la superficie

permanece sin alterar y cubierta con rastrojo, llegando a la conclusión que las condiciones generadas por la labranza en franjas podrían provocar una diferencia en el rendimiento de los cultivos en caso de situaciones de exceso o déficit hídrico. Esto podría explicar la tendencia a mayores rendimientos encontradas en las muestras provenientes de las parcelas compactadas del presente ensayo (Tabla 3.5.1 y Figura 3.5.1)

Tabla 3.5.2: Contrastes ortogonales prefijados del efecto del sistema de labranza para cada tratamiento de compactación sobre el rendimiento promedio (kg ha^{-1}).

Contraste	Grado de libertad	Cuadrado de la media	Valor F	Pr > F
LF vs. SD en C	1	41827051,73	4,76	0,006
SD en C vs. SD en SC	1	4657459,37	1,51	0,225
Total	2	23242255,55	7,56	0,001

Referencias: LF, subtratamiento de labranza en franjas; D, subtratamiento de siembra directa; C, tratamiento compactado; SC, tratamiento sin compactar



Figura 3.5.1: Vista de una de las parcelas en estudio.

4. Conclusiones

La utilización del sistema de labranza en franjas permitió disminuir la densidad aparente y la resistencia mecánica del suelo, sin perjudicar la implantación del cultivo. Las mejoras en la fertilidad física del suelo generadas por la labranza en franjas evidenciaron un incremento sobre el rendimiento del cultivo de maíz, principalmente en las parcelas con mayor grado inicial de densificación del suelo.

Estos hallazgos corresponden a un año deficitario en cuanto a humedad, con alta demanda atmosférica y a un lote con un suelo franco arcillo limoso, correspondiente a un Argiudol Vértico. Es posible concluir, que para las condiciones descritas en este ensayo, el sistema de labranza en franjas mejoró, tanto los parámetros de calidad de suelo como el rendimiento del cultivo de maíz.

Se debería seguir estudiando el efecto en otros tipos de suelo y diferentes condiciones climáticas. Otro parámetro de importancia que podría ser estudiado es la tasa de infiltración. Además, sería conveniente realizar un seguimiento de los parámetros del suelo durante el ciclo del cultivo.

Bibliografía

- Afzalnia, S. y Zabihi, J.; 2014. Soil compaction variation during corn growing season under conservation tillage. *Soil & Tillage Research* 137: 1–6
- Al-Adawi, S.S. y Reeder, R.C.; 1996. Efecto de la compactación y el subsolado sobre los rendimientos de soja y maíz y las propiedades físicas del suelo. *Transactions of ASAE* Vol 39 (5): 1641-1649
- Álvarez, R. y Steinbach, H.S., 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 Facultad de Agronomía-Universidad de Buenos Aires y CONICET, *Contents Soil & Tillage Research* 104: 1–15. doi:10.1016/j.still.2009.02.005
- ASAE, 1992. ASAE Standards S3123.1: Soil cone penetrometer. ASAE, St. Joseph, M.I.
- ASAE, 1996. ASAE Standards S526.1: Soil and water terminology. ASAE, St. Joseph, M.I.
- Baker, C.J., Saxton, K.E. y Ritchie, W.R., 1996. *No-tillage Seeding: Science and Practice*. CAB International, Wallingford, UK.
- Béyard, Y.; Tessier, S.; Lague, C.; Chen, Y. y Chi, L.; 1997. Soil compaction by manure spreaders equipped with standard and oversized tired and multiple axles. *Transaction of the ASAE* 40 (1): 37-43.
- Bicki, T.J. y Siemens, J.C.; 1991. Crop response to wheel traffic soil compaction. *Transactions of ASAE* 34(3): 909-913.
- Bono, A.; Álvarez, R.; Buschiazzo, D.E.; y Cantet, R.; 2008. Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystem. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72: 1140-1149.
- Borrás, L. y Gambín, B.; 2011. Informe final Red de Maíz Tardío: Campaña 2011-12, p. 15-22. En: *Red de Evaluación de híbridos de maíz en siembras tardías. Zona núcleo pampeana: campaña 2011-2012*. Rosario: AAPRESID. 24 p.
- Botta, G.F.; Tolón-Becerra, A.; Lastra-Bravo, X.; Tourn, M.; Balbuena, R. y Rivero, D.; 2013. Continuous application of direct sowing: Traffic effect on subsoil compaction and maize (*Zea mays* L.) yields in Argentinean Pampas. *Soil & Tillage Research* 134: 111–120 pp.
- Busscher, W.J.; Sojka, R. E. y Doty, C. W.; 1986. Residual effects of tillage on Coastal Plain soil strength. *Soil Sci.* 141: 144-148.

- Carter, M.R.; 1988. Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in tillage studies. *Canadian Journal of soil Science*, vol. 68 (4): 657-668.
- Chen, Y.; Tessier, S. y Rouffi Gant, J.; 1998. Soil bulk density estimations for tillage systems and soil textures. *Trans. ASAE* 41: 1601-1610.
- Díaz-Zorita, M.; Duarte, G.A. y Grove, J.H.; 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 65 (1): 1-18
- Filipovic D., Husnjak S., Kosutic S. y Gospodaric Z., 2006. Effects of tillage systems on compaction and crop yield of Albic Luvisol in Croatia. *Journal of Terramechanics* 43: 177-189
- Gaultney, L.; Krutz, G.W.; Steinhardt G.C y Liljedahl J.B.; 1982. Effects of subsoil compaction on corn yields. *Transactions of the ASAE* 25 (3): 563-575.
- Goodman, A.M. y Ennos, A.R.; 1998. Responses of the Root Systems of Sunflower and Maize to Unidirectional Stem Flexure. *Ann Bot* 82 (3): 347-357. doi: 10.1006/anbo.1998.0693
- Grzesiak Stanisław, Grzesiak Maciej T., Hura Tomasz, Marcińska Izabela y Rzepka Andrzej, 2013. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction. *Environmental and Experimental Botany* 88: 2 -10
- Gupta S.C. A. Hadas W.B. Voorhees D.Wolf W.E. Larson y P.P. Sharma. 1990. Development of guide on the susceptibility of soils to excessive compaction. Research Report submitted to BARD Fund. On Completion of Project Grant N° U.S. 973-85.
- Håkansson, I. y Reeder, C.R. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load - extent, persistence and crop response. *Soil & Tillage Research*, 29 (2-3): 277-304.
- Håkansson, I., Voorhees, W.B. y Riley, H., 1988. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop responses in different traffic regimes. *Soil Till. Res.* 11, 239-282.
- Hares, M.A. y Novak, M.D.; 1992. Simulation of surface energy balance and soil temperature under strip tillage: II Fiel Test. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 56: 29-36.

- Jung Ki-Yuol, Newell R. Kitchen, Kenneth A. Sudduth, Kyou-Seung Lee y Sun-Ok Chung; 2010. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape.
- Kay, B.D. y VandenBygaart, A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Tillage Res.* 66: 107–118.
- Koch H.J.; 2008. Cumulative effect of annually repeated passes of heavy agricultural machinery on soil structural properties and sugar beet yield under two tillage systems.
- Licht M.A. y Al-Kaisi, M.; 2005. Corn response, nitrogen uptake, and water use in Strip-Tillage compared with No-Tillage and Chisel Plow. *Agronomy Journal* 97: 705–710. doi:10.2134/agronj2004.0102
- Lipiec, J. y Hatano, R., 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma, Quantifying agricultural management effects on soil properties and processes.* Volume 116, Issues 1–2, Pages 107–136
- Martellotto, E.; Salas, P.; Lovera, E.; Salinas, A.; Giubergia, J. y Lingua, S. 2004. Balance hídrico para riego. Proyecto regionales: Agricultura Sustentable Gestión Ambiental. Área de Recursos Naturales y Agronomía, INTA.
- Michelena, R. O. e Irurtia, C. B., 2006. Informe de Investigación. Instituto de Suelos. CRN. CNIA. INTA.
- Miransari, M., Bahrami, H. A., Rejali, F. y Malakouti, M. J., 2009. Effects of soil compaction and arbuscular mycorrhiza on corn (*Zea mays* L.) nutrient uptake. *Soil & Tillage Research* 103: 282–290.
- Morgan, M.T., R.G.Holmes y R.K. Wood. 1993. A system for measuring soil physical properties in the field. *Soil and Tillage Research*, 26: 301-325.
- Morrison, J. E. Jr.; 2002. Strip Tillage for “No-Till” row crop production. *Applied Engineering in Agriculture.* Vol. 18(3): 277–284 2002 American Society of Agricultural Engineers ISSN 0883–8542
- Munkholm, L.J.; Schjonning, P.; Rasmussen, K.J. y Tanderup, K.; 2003. Spatial and temporal effects of direct drilling on soil structure in the seedling environment. *Soil & Tillage Research* 71: 163-173. doi:10.1016/S0167-1987(03)00062-X

- Navarro-Bravo, A., Figueroa-Sandoval, B., Ordaz-Chaparro, V. M. y González-Cossío, F. V.; 2000. Efecto de la labranza sobre la estructura del suelo, la germinación y el desarrollo del maíz y frijol. *Terra*, 18: 61-69.
- Paredes, D.; Roba, M.A.; Duro, S.; D'Amico, J.P.; Venturelli, L.; Romito, A. y Tesouro, M.O.; 2007. Evaluación de un accesorio escarificador para sembradoras de grano grueso en un cultivo de girasol. IX Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. 10 p.
- Quiroga, A. R., Buschiazzo, D. E. y Peinemann, N., 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil & Tillage Research* 52: 21-28.
- Raper, R. L. y Bergtold, J. S.; 2007. In-Row subsoiling: A review and suggestions for reducing cost of this conservation tillage operation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 23(4): 463-471.
- Raper, R. L. y Schwab, E. B., 2009. Development of an in-row subsoiler attachment to reduce smearing. *American Society of Agricultural and Biological Engineers. Applied Engineering in Agriculture*. Vol. 25(4): 495-503
- Raper, R. L., 2005. Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics* 42: 259-280.
- Reeder, R.; 2002. Maximizing Performance in Conservation Tillage Systems. An overview. ASAE/CIGR XVth World Congress. Chicago, Illinois, USA.
- Sadras V. O., O'Leary, G. J. y Rogeta, D. K.; 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Research*. Volume 91: 131-148
- SAGPyA. 2009. Estimaciones agrícolas mensuales. Cifras oficiales. (Consulta septiembre 2010 - <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/>)
- Schuler, R. T. y Wood R. K., 1992. Soil compaction. In *Conservation Tillage Systems and Management*, Ch 9, 42-45. Ames, Iowa: MidWest Plan Service.
- Soane, B.D. y van Ouwerkerk, C.. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil Tillage res.* 35 (1): 5-22.
- Soil Science Society of America, 1996. Editorial. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 37: 02-08.

- Sojka, R.E.; Busscher, W.J.; Gooden D.T. y Morrison, W.H.; 1990. Subsoiling for sunflower production in the southeast coastal plains. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54: 1107-1112.
- Spoor G., 2006. Alleviation of soil compaction: requirements, equipment and techniques. *Soil Use and Management*, June 2006, 22, 113–122
- Stenitzer, E., 1988. SIMWASER-Ein Numerisches Modell zur Simulation des Bodenwasserhaushaltes und des Pflanzenertrages eines Standortes. Mitteilung Nr. 31 der Bundesanstalt für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, Pethenkirchen, Austria.
- Swan, J.B., Schneider, E.C., Moncrief, J.F., Paulson, W.H. and Peterson, A.E., 1987. Estimating corn growth, yield, and grain moisture from air growing degree days and residue cover. *Agron. J.*, 79: 53-90.
- Tesouro, M.O.; D'Amico, J.P.; Romito, A.; Paredes, D; y Roba, M.A.; 2009 a. Evaluación de un accesorio descompactador para sembradoras de grano grueso. Informe técnico de siembra N° 7, Instituto de Ingeniería Rural, CNIA, INTA.
- Tesouro, M.O.; Romito; A. Donato; L.B. González; N. Elisei; J. Paredes D. y Roba, M., 2009 b. Evaluación de las características de la siembra de maíz en el área de influencia de la EEA Pergamino (Buenos Aires). En: *Actas del X Congreso de Ingeniería Rural y II del MERCOSUR*. 1ra Ed. UNR Editora. p 263-271 (en CD-ROM) ISBN 978-950-673-748-1.
- Tollenar, M. y Wu, J. 1999. Yield improvement in temperate maize is attributable to greater stress tolerance. *Crop Sci.* 39: 1597-1604.
- Trevini, M.; Benincasa P. y Giducci M.; 2013. Strip tillage effect on seedbed tilth and maize production in Northern Italy as case-study for the Southern Europe environment. *European Journal of Agronomy* 48: 50-56.
- Unger, P.W., 1993. Reconsolidation of Torrertic Paleustoll after tillage with paratill. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 195-199.
- Unger, P.W.; 1995. Soil bulk density, penetration resistance, and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. *Soil & Tillage Research* 37: 67-75.

}