

Labranza vertical: Efecto sobre un suelo compactado y el rendimiento de un ciclo trigo - maíz.

Omar Tesouro¹ / Ángel Romito¹ / Juan D'Amico¹ / Marcos Roba¹ / Julio Pollacino²

Instituto de Ingeniería Rural - CIA - CNIA - INTA Castelar

¹ Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos

² Facultad de Agronomía y Cs. Agroalimentarias - Universidad de Morón

Informe Técnico N° 22
Marzo 2013



Ediciones

Instituto Nacional de
Tecnología Agropecuaria



Informe Técnico Nº 22

ISSN 1852-3080

Marzo 2013

Labranza vertical: Efecto sobre un suelo compactado y el rendimiento
de un ciclo de trigo – maíz

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Instituto de Ingeniería Rural

Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos

Editor responsable: Ing. Agr. Mario Omar Tesouro

Av. Pedro Díaz 1798
Hurlingham - Buenos Aires - Argentina
C.C. 25 B1712 JHB Castelar
Tel/fax 4665-0495

iir.cd@inta.gob.ar

www.inta.gob.ar/unidades/222000

ÍNDICE GENERAL

Resumen	2
1. Introducción	3
2. Materiales y Métodos	6
2.1. Sitio experimental	6
2.2. Características de la máquina sembradora	8
2.3. Diseño experimental	9
2.4. Toma de muestras y mediciones	10
3. Resultados y Discusión	12
3.1. Densidad aparente	12
3.2. Resistencia a la penetración	15
3.3. Rendimiento del cultivo	20
3.3.1. Trigo	20
3.3.2. Maíz	22
4. Conclusiones	26
5. Bibliografía	27

LABRANZA VERTICAL: EFECTO SOBRE UN SUELO COMPACTADO Y EL RENDIMIENTO DE UN CICLO DE TRIGO – MAÍZ

RESUMEN

La compactación del suelo puede entenderse como la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa del mismo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él. Este fenómeno disminuye la infiltración, incrementa la tasa de erosión y el escurrimiento y reduce el crecimiento de las plantas. Este proceso de degradación tiene diferente expresión según la textura del suelo, por lo tanto el riesgo de compactación variará en función del clima y los tipos de suelo. El presente trabajo se realizó en el marco del Convenio firmado entre la Universidad de Morón (UM) y el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) para determinar el efecto de la labranza vertical sobre propiedades físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de trigo en un Argiudol vértico con diferentes grados de compactación. En el área experimental se efectuaron en el mes de julio de 2000, tres tratamientos de compactación consistentes en 4, 6 y 8 pasadas con un tractor de 10.000 kg de peso, permaneciendo como testigo un sitio sin transitar. En julio de 2004, cada una de las parcelas fue dividida en dos subparcelas. En una de ellas, se efectuó un escarificado del suelo a una profundidad entre 0,35-0,40 m en sentido transversal a los bloques con un cultivie de seis arcos. Se mantuvieron subparcelas bajo siembra directa y subparcelas con labranza, las que fueron roturadas a una profundidad de 0,25 m mediante un arado de cincel. El cultivo de trigo fue implantado en julio de 2008, mediante siembra directa. Posteriormente se implantó con la misma técnica un cultivo de maíz en la temporada 2009. La labranza con cincel resultó útil para reducir la densidad aparente. Su efecto varió en función del estado del suelo y se prolongó durante todo el ciclo del cultivo. El efecto sobre el rendimiento varió según el cultivo.

1. INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso con una velocidad de degradación rápida y tasas de formación y regeneración extremadamente lentas. La compactación del suelo puede entenderse como la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa del mismo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él. La Soil Science Society (1990) la define como “el proceso por el cual las partículas del suelo sufren un rearrreglo, aumentando el contacto entre sí mismas, disminuyendo el espacio poroso e incrementando la densidad aparente”.

El uso agrícola intensivo e inadecuado al que se ha visto sujeta la región pampeana y dentro de ella la pampa ondulada cultivada con arado de reja y rastras durante más de 80 años, provocó un deterioro importante de las propiedades físicas del suelo debido a su vasta historia agrícola y su textura limosa. En el trabajo: “Degradación de Suelos en el Norte de la Región Pampeana”, Michelena et al. (1989), llevaron a cabo un estudio sobre la degradación de los suelos de la región pampeana norte que abarca 5.000.000 ha. Los autores concluyeron que los parámetros de propiedades físicas del suelo habían sufrido una disminución importante con respecto a suelos testigo (sin efecto antrópico). Las pérdidas de materia orgánica promedio fueron 37,3% a 46,7% en suelos bajo rotación ganadera y en agricultura continua, las de estructura fueron del 45,4% a 66,3% y las de percolación del 49% a 62%, respectivamente. Toda la región presentaba degradación física y química en diversos grados. También se produjo un deterioro de la estructura y la reducción de la percolación con signos comunes de la compactación como el encostramiento y el piso de arado, que afectan las propiedades hidrológicas de las tierras.

A partir de 1990 este proceso se agravó por la intensificación de la agricultura con doble cultivo anual trigo-soja. Si bien la siembra directa, que fue adoptada ampliamente en los últimos 20 años en la Argentina, controla eficientemente la erosión, no ha logrado revertir el proceso de compactación del suelo (Ferreras et al., 2001).

Los efectos de la compactación del suelo sobre los cultivos y sobre las propiedades edáficas son complejos (Batey, 1990). La compactación disminuye la infiltración, incrementa la tasa de erosión y el escurrimiento y disminuye el crecimiento de las plantas

(Mc Garry, 2001). En tierras agrícolas hay que considerar tanto compactación superficial como subsuperficial. Desde el punto de vista agrícola la compactación tiende a disminuir las cantidades de agua y nutrientes disponibles para las raíces. Es un proceso de densificación y distorsión en el que se reducen la porosidad de aire y la permeabilidad, aumenta la resistencia, la estructura se destruye en parte y se producen otros cambios en el comportamiento del suelo (Soane y van Ouwerkerk, 1995). El citado proceso está ocasionado en gran medida por el tránsito de la maquinaria agrícola y el pisoteo de los animales. La consecuencia directa es la pérdida de la productividad del suelo. Por otra parte se ocasionan efectos indirectos fuera del ámbito rural ya que aumenta el riesgo de inundaciones por los mayores aportes de escurrimiento superficial en las cuencas rurales y urbanas. La compactación es reconocida por los productores con pocos elementos, ya sea visualmente como el mayor encharcamiento o mediante la resistencia que ofrece a ser clavado un cuchillo o una pala en el suelo. Para solucionarlo la decisión es descompactar con subsolador aunque los resultados son muy variables. Si bien realiza una remoción vertical del suelo, produce considerables efectos de roturación laterales. La zona alterada presenta un perfil en forma de V, donde el suelo se fragmenta en bloques relativamente grandes en las capas superficiales mientras que los agregados de menor tamaño se sitúan en las capas profundas. Uno de los problemas es que sus resultados no son predecibles y el efecto benéfico es de corta duración. Los especialistas en el tema coinciden en que cada situación merece un estudio particular y un tratamiento integral (Melero et al. 2011; He Jin et al., 2011; Weisskopf et al. 2010; Raper et al., 2009; Hamza et al., 2005).

Con el mejoramiento de las alternativas para controlar el proceso de compactación de suelos, varios son los aspectos que directa o indirectamente beneficiarán a los productores agropecuarios y a la población en general. Formas de manejo sustentables más eficientes en el uso de la energía, capaces de reconstruir la estructura del suelo y mantener y/o aumentar su productividad conducen a menores emisiones de CO₂, menores costos operativos, a la recuperación de las propiedades físicas del suelo con el mejoramiento de la economía del agua, de la circulación del aire en el perfil y de la exploración de las raíces (Al-Adawi y Reeder, 1996). Estos aspectos se relacionan con incrementos en la productividad del suelo, la disminución del escurrimiento superficial y

las bajas tasas de erosión hídrica, como consecuencia de la alteración en la orientación de los bloques de suelo y aumento del volumen de macroporos (Bonel et al., 2004). Unger (1996) señala que el tránsito controlado mantiene gran parte del terreno productivo en óptimas condiciones para el crecimiento, desarrollo y rendimiento de los cultivos agrícolas.

La disminución de la tasa de erosión, si bien beneficia directamente al productor como ya fue señalado, tiene efectos positivos para la población en general, dado que a bajas tasas de erosión corresponden menores cargas de sedimentos y contaminantes en ríos y reservorios, los que en muchas ocasiones son de aprovechamiento urbano. Mediciones realizadas con simulador de lluvias indican que los suelos compactados sufren entre un 30 a 40 % más de escurrimiento lateral que los suelos escarificados (Irurtia y Mon, 2000).

La intensificación de la agricultura en los últimos años condujo a una mayor presión productiva sobre el recurso suelo. Si bien la siembra directa significó un gran adelanto en el manejo de los suelos, sobretodo en lo que hace al control de la erosión y reposición de materia orgánica, el cada vez más intenso tránsito de la maquinaria agrícola contribuyó a una mayor densificación del suelo superficial. Labores tan importantes como la cosecha realizadas en condiciones de excesiva humedad edáfica, son operaciones frecuentes que tienden a la compactación del suelo. Este proceso de degradación tiene diferente expresión según la textura del suelo, por lo tanto el riesgo de compactación variará según el clima y los tipos de suelo.

Si bien no se dispone de un relevamiento de suelos compactados, los productores están usando en forma cada vez más frecuente *descompactadores* para intentar resolver un problema físico del suelo, que definen como compactación. Realizan esta labor utilizando herramientas de labranza vertical, buscando generar porosidad, mejorar la percolación y promover el desarrollo de las raíces sin invertir el pan de tierra.

Actualmente se reconoce a la producción agropecuaria como la base de la economía argentina y al suelo como el soporte de la actividad. El futuro presenta un escenario de mayor intensificación de uso, con mayores riesgos de degradación de suelos.

Uno de los objetivos del Laboratorio de Terramecánica e Implantación de Cultivos (IIR - INTA Castelar) es definir la susceptibilidad a la compactación de distintos ambientes productivos y en ellos, los umbrales críticos de los parámetros físicos del suelo que afectan el rendimiento de los cultivos, a fin de obtener criterios que permitan decidir la conveniencia o no de aplicar medidas correctivas.

El objetivo del presente trabajo fue determinar el efecto de la labranza vertical sobre propiedades físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de trigo y maíz, en un Argiudol vértico con diferentes grados de compactación.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Sitio experimental

El ensayo se realizó en el campo experimental del Instituto de Ingeniería Rural (INTA Castelar. Provincia de Buenos Aires, 34° 36' 20,69" S; 58° 40' 2,56" O) sobre un suelo que pertenece al gran grupo de los Argiudoles Vérticos. El contenido de arcilla del horizonte Ap es del 28,5 %, y el de materia orgánica del 4,6 %. La clase textural es franco arcillo limoso, siendo la humedad equivalente del 24,9 %. El relieve del área es Normal. La zona se caracteriza por presentar un clima templado. La temperatura media anual es de 18 °C y las precipitaciones medias anuales corresponden a la isohieta de 900 mm (SAGyP, 1990). En el área experimental se efectuaron en el mes de julio de 2000 tres tratamientos de compactación (por única vez), consistentes en 4, 6 y 8 pasadas con un tractor de 10.000 kg de peso, permaneciendo como testigo un sitio sin transitar, con lo cual quedaron definidas las parcelas 4, 6, 8 y 0 respectivamente. Al momento de realizar los mencionados tratamientos de compactación, el suelo se encontraba en capacidad de campo. Cada tratamiento fue repetido tres veces, en un diseño en bloques completos aleatorizados. Los bloques poseen una extensión de 20 m y un ancho de 10,5 m y están dispuestos en forma perpendicular a una toposecuencia que determina que el horizonte textural se encuentre a distinta profundidad. El bloque I, de perfil más somero, se ubica en la loma, el II en la media loma y el III, el más profundo, en el bajo. Las dimensiones de cada una de las 12 parcelas son 10,5 m de largo por 5 m de ancho. Luego de la

preparación de las parcelas se inició una rotación de trigo y soja implantados mediante siembra directa.

En julio de 2004, cada una de las parcelas fue dividida en dos subparcelas: con labranza y directa. En las parcelas con labranza se efectuó por única vez un escarificado del suelo a una profundidad entre 0,35 – 0,40 m en sentido transversal a los bloques, con un cultivo de seis arcos separados a 0,50 m. Por lo tanto, a partir de ese momento, se mantuvieron subparcelas bajo siembra directa y subparcelas con labranza. Éstas últimas fueron roturadas, previo a las diferentes siembras, con un arado de cincel de arcos flexibles separados a 0,27 m, trabajando a una profundidad de 0,25 m. Desde el 2004 hasta el 2008, se implantaron dos cultivos de soja (2004 y 2006) y uno de girasol (2005), todos con la misma sembradora. El resto del tiempo las parcelas se mantuvieron en barbecho.

El cultivo de trigo fue implantado el 28 de julio de 2008, mediante siembra directa. La labor se realizó a una velocidad de avance de 6 km h^{-1} . La densidad de siembra prevista fue de 39,3 semillas por metro lineal de surco ($90,7 \text{ kg ha}^{-1}$) con un distanciamiento entre líneas de 0,175 m. Se utilizó semilla de la variedad Klein Gavilán con una pureza del 99%, un poder germinativo de 85% mínimo y un peso de mil semillas de 40,37 g.

La siembra del cultivo de maíz se realizó con la misma sembradora el 11 de noviembre del siguiente año. Se utilizó una variedad híbrido de Agrosemillas del Sur (AD-615) con una densidad de siembra de 6,5 semillas por metro, con valores de pureza y poder germinativo superiores al 90%.



Figura 1: Izquierda: Escarificado del suelo con cultivie. Derecha: Detalle de la púa (órgano activo de la herramienta)

2.2. Características de la máquina sembradora

- Marca: Schiarre 2500 Tekno SDX
- Configuración del tren de siembra:
- Cuchilla de corte primario: turbo de 25 ondas de 43,18 cm (17") de diámetro
- Abresurco de doble disco de igual diámetro
- Doble rueda limitadora de profundidad. Cubierta semineumática Ancho: 7,3 cm (2" 7/8) diámetro: 38,1 cm (15")
- Rueda contactadora (banda de goma maciza, sección prismática sin regulación de carga)
- Doble rueda tapadora con banda de goma y disco escotado.



Figura 2: Sembradora utilizada en el ensayo



Figura 3: Cuerpo de siembra alistado con la cuchilla Turbo de 25 ondas

2.3. Diseño experimental

La evaluación estadística de los parámetros físicos del suelo se efectuó mediante análisis de varianza para un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA). Los efectos principales considerados en dicho análisis fueron los bloques (loma, media loma y bajo), el cincelado (tratamiento), las parcelas (tratamiento de compactación) y las profundidades a las que fueron tomadas las muestras de suelo. Se incluyeron en el modelo las interacciones entre el tratamiento de labranza y el resto de los efectos. La significación estadística del tratamiento en los bloques, parcelas y profundidades fue determinada mediante la prueba de comparaciones múltiples de Tukey con $\alpha=0,05$ y

contrastes ortogonales. Para el análisis del rendimiento de los cultivos se utilizó el mismo modelo estadístico, pero en este caso los efectos principales considerados fueron el tratamiento, las parcelas y los bloques.

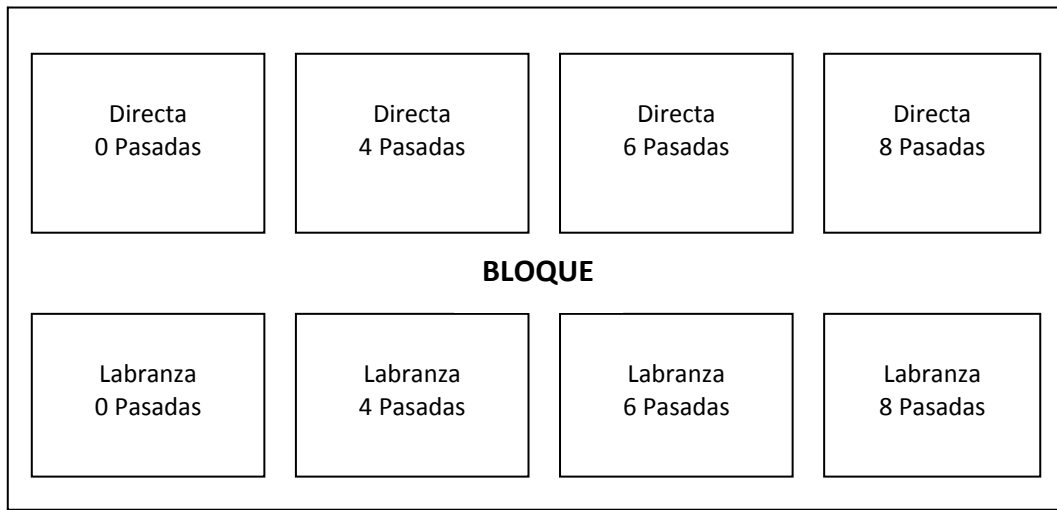


Figura 4: Representación esquemática del diseño experimental (bloque). Referencias: Directa: Siembra Directa. Labranza: Cincelado. Pasadas: Compactación aplicada a través de n pasadas del tractor.

2.4. Toma de muestras y mediciones

Luego de efectuada la cosecha de trigo en la última semana de diciembre del año 2008 y a fin de cuantificar la magnitud y la persistencia del efecto del escarificado, fueron relevados en los bloques II y III, el contenido de humedad y la densidad aparente del suelo en los surcos y en los entresurcos y los perfiles de resistencia del suelo. La densidad aparente se determinó tomando tres muestras de suelo en cada una de las subparcelas, empleando cilindros de 50 mm de longitud por 50 mm de diámetro, los cuales fueron colocados a cuatro profundidades sucesivas a fin de evaluar el horizonte superficial entre 0,00 y 0,20 m, totalizando 24 muestras por parcela. Debido a las características texturales y mineralógicas del suelo donde se realizó el ensayo, este parámetro resulta sustancialmente afectado por el contenido de humedad del suelo al momento de extraer las muestras. Para superar este inconveniente, la densidad aparente se calculó considerando la contracción que experimentan las muestras de suelo luego de ser mantenidas a 105 °C hasta constancia de peso. Es decir, al retirar la muestra seca del cilindro, se pesó y se calculó su volumen, obteniéndose la densidad aparente como el cociente entre ambos valores. 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, mediante la siguiente fórmula:

$$H_g (\%) = \left[\frac{\text{peso}_{\text{húmedo}} - \text{peso}_{\text{seco}}}{\text{peso}_{\text{seco}}} \right] \otimes 100$$

Las muestras de humedad gravimétrica y resistencia a la penetración fueron tomadas simultáneamente debido a la estrecha relación existente entre dichas variables. Los perfiles de resistencia del suelo fueron determinados, en cada una de las parcelas, muestreando a lo largo de tres transectas, perpendiculares a la dirección de siembra, hasta una profundidad de 0,45 m. Utilizando un penetrómetro estandarizado (ASAE Standard S.313.2 1992), se efectuaron mediciones cada 0,35 m abarcando la totalidad de los surcos de la sembradora.

La cosecha, que incluyó las subparcelas cinceladas y sin cincelar de los tres bloques, en el caso del trigo se realizó manualmente a fines de diciembre de 2008, recolectando al azar tres muestras de dos metros de surco por subparcela. Las muestras fueron trilladas mediante una máquina estacionaria.

En cuanto al maíz, la cosecha se realizó el 29 de marzo de 2010. Se colectaron a mano, cinco metros de surco, registrando el número de plantas e identificando y manteniendo la individualidad de cada línea de cultivo, para cada tratamiento y subparcela.



Figura 5: Vista panorámica del cultivo de trigo momentos antes de la cosecha.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se analizaron los rendimientos de los tres bloques: loma (I), media loma (II) y bajo (III). La densidad aparente y la resistencia a la penetración fueron evaluadas con los datos obtenidos para la media loma y el bajo (bloques II y III respectivamente).

3.1. Densidad aparente

Se encontraron diferencias altamente significativas en la densidad aparente del suelo por efecto de la labranza ($F=10,54$; $Pr>F=0,0023$), de las parcelas ($F=9,20$; $Pr>F<0,0001$) y de la profundidad a la cual fue obtenida la muestra ($F=94,56$; $Pr>F<0,0001$). No se detectaron diferencias significativas por efecto de los bloques ($F=0,33$; $Pr>F=0,5697$).

Las parcelas, que representan la cantidad de pasadas de tractor al momento de realizar la compactación, se ordenaron en dos grupos homogéneos, siendo las de 8 y 6 pasadas las de mayor densidad media ($1,47$ y $1,46$ $g\ cm^{-3}$ respectivamente vs $1,41$ y $1,42$ $g\ cm^{-3}$ para los testigos y las parcelas 4). En cuanto a las diferencias encontradas en profundidad, se observaron aumentos significativos de la densidad aparente a medida que se incrementaba el nivel de este factor.

La densidad aparente promedio de los sitios sin disturbar, fue estadísticamente superior a la de los sitios disturbados, alcanzando valores de 1,45 y 1,42 g cm⁻³ respectivamente. En principio, el efecto de los tratamientos coincide con lo expuesto por Raper et al. (1998) quienes afirman que la utilización de sistemas de labranza vertical, permite mejorar la condición de un suelo agrícola. Sin embargo, las interacciones entre el tratamiento y las parcelas, que se mencionan a continuación, indican que la efectividad del tratamiento de labranza resultó dependiente del estado de densificación del suelo al momento de realizar la labor.

La interacción (Figura 6) entre parcela y tratamiento de labranza presentó significación estadística (F=2,92; P=0,0451). El efecto del tratamiento fue mínimo en los testigos y máximo en las parcelas 8. Éstas últimas fueron las únicas en las que se manifestó una reducción definida en la densidad aparente a causa de la labranza.

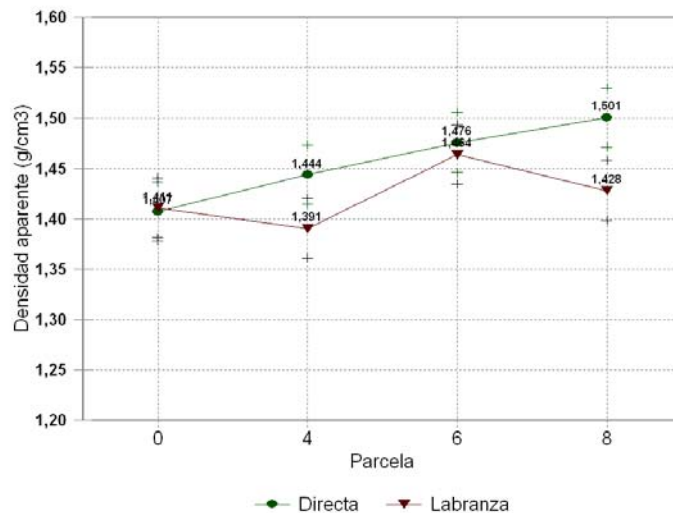


Figura 6: Interacción parcela * tratamiento

En la media loma (BII) dicha reducción no alcanzó el nivel de significación (Pr>t = 0,0711), pero sí lo hizo en el bajo (BIII; Pr>t = 0,0034). Tesouro et al. (2005) evaluando un órgano de labranza, encontraron una respuesta diferencial del mismo en función del grado de compactación de las parcelas. En las más compactadas la acción fue significativamente mayor que en las parcelas testigo. Asimismo, Paredes et al. (2007, 2009) también observaron una respuesta diferencial a la labranza en función del nivel de compactación de las parcelas bajo ensayo.

Por otra parte, si el análisis se limita a los sitios no laboreados (Directa; Figura 6), puede apreciarse fácilmente el incremento de la densidad aparente en las parcelas en función de la intensidad del tránsito aplicado en cada una de ellas. En efecto, la densidad aparente de las parcelas más compactadas se diferenciaron netamente de los testigos, alcanzando niveles de significación de 0,0840 ($Pr > t$ Testigos vs Parcelas 4), de 0,002 ($Pr > t$ Testigos vs Parcelas 6) y menor a 0,0001 ($Pr > t$ Testigos vs Parcelas 8). Lo expresado anteriormente indica que el efecto del tratamiento de compactación, realizado en el año 2000, fue claramente perceptible al momento de realizar este análisis, pese al tiempo transcurrido y a que por las características texturales del suelo donde se realizó el ensayo puede considerarse como altamente resiliente. Dicho comportamiento coincide con lo hallado por Al-Adawi y Reeder (1996), quienes observaron que los efectos de la compactación persistían hasta 5 años después de efectuados los tratamientos.

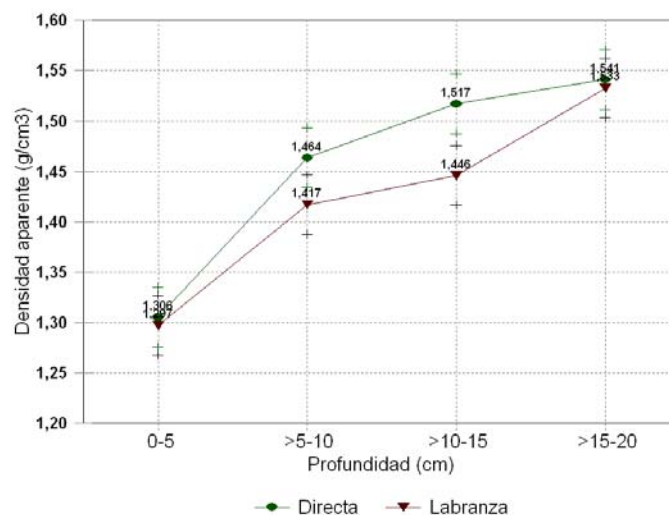


Figura 7: Interacción profundidad * tratamiento

La interacción profundidad * tratamiento no llegó a ser significativa ($F=2,22$; $Pr>F=0,1003$). Sin embargo, se encontró que en el estrato superior ($Pr>t=0,6928$) e inferior ($Pr>t=0,6838$) las densidades aparentes obtenidas con y sin labranza resultaron casi coincidentes, mientras que en los rangos de 5 a 10 cm ($Pr>t=0,0297$) y de 10 a 15 cm ($Pr>t=0,0013$) las diferencias alcanzaron significación estadística (Figura 7). La interacción bloque * tratamiento (Figura 8) no fue significativa ($F=0,52$; $Pr>F=0,4763$).

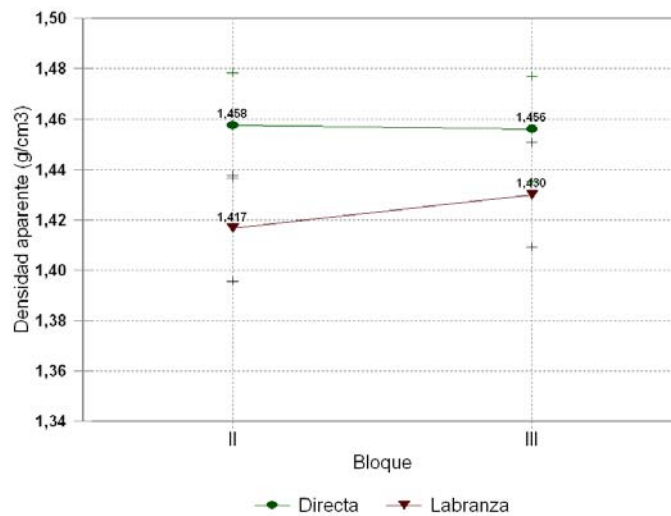


Figura 8: Interacción bloque * tratamiento

3.2. Resistencia a la penetración

Respecto a la resistencia a la penetración, medida a través del índice de cono en el rango de profundidades de 0,00 a 0,45 m, se encontraron diferencias significativas en las resistencias medias para todos los factores estudiados, con elevados niveles de significación ($Pr>F <0,0001$). En una primera apreciación, se destaca que el tratamiento de labranza presenta una media general de 1564,0 kPa y el tratamiento de siembra directa alcanza un valor promedio de 2068,3 kPa.

Sin embargo, la principal característica del análisis estadístico de la resistencia a la penetración fueron las interacciones de segundo orden y las diferencias observadas al comparar el rango de profundidades de 0,00 a 0,20 m, el cual muestra el efecto de la labranza realizada en forma previa a la implantación del cultivo, con el de 0,00 a 0,45 m,

que involucra también el efecto del subsolado efectuado cuatro años antes de la siembra del trigo.

En el rango de 0,00 a 0,45 m, la única interacción simple que no alcanzó significación estadística ($F=2,13$; $Pr>F=0,0997$) fue la que relacionó los tratamientos con las parcelas (figura 9). El resto de las interacciones fueron altamente significativas. En el rango de 0,00 a 0,20 m, la interacción no significativa ($F=2,26$; $Pr>F=0,0769$) fue la existente entre la profundidad y el tratamiento (Figura 10).

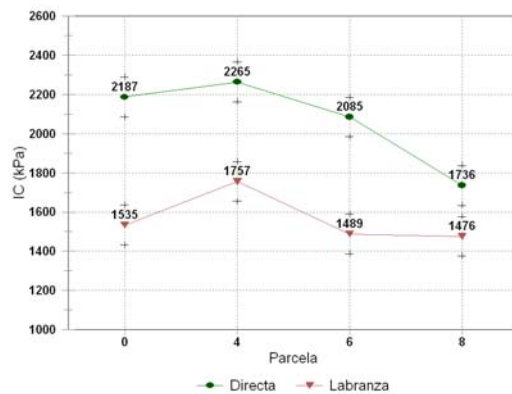


Figura 9: Interacción parcela * tratamiento en el rango de profundidad de 0,00 a 0,45 m.

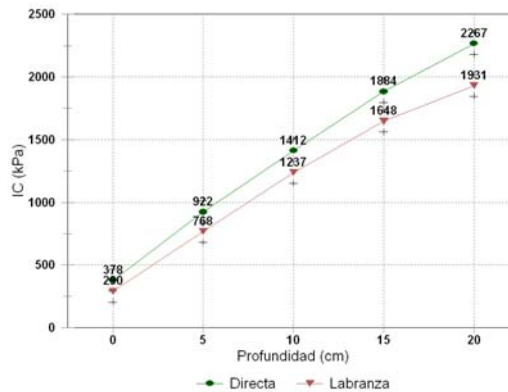


Figura 10: Interacción profundidad * tratamiento en el rango de profundidad de 0,00 a 0,20 m.

En las figuras 11 y 12 puede apreciarse un mayor efecto de la labranza en la media loma (BII) que en el bajo (BIII) si se considera la resistencia de la totalidad del perfil. Esta observación resulta diametralmente opuesta si el análisis se limita solamente a los primeros veinte centímetros de profundidad.

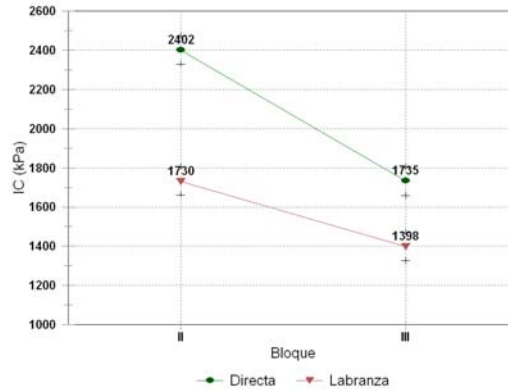


Figura 11: Interacción bloque * tratamiento en el rango de profundidad de 0,00 a 0,45 m.

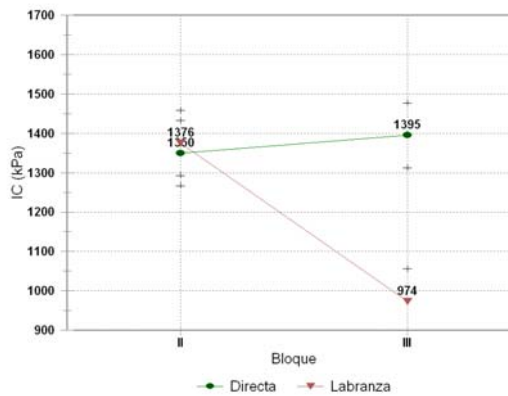


Figura 12: Interacción bloque * tratamiento en el rango de profundidad de 0,00 a 0,20 m.

En las figuras 13 y 14 se representa la resistencia del suelo en función de la profundidad para cada uno de los bloques. En la media loma, la resistencia del suelo en los sitios labreados es significativamente menor a la de aquellos manejados en directa para toda profundidad mayor a los 0,20 m. Se presume que la variación en la resistencia del suelo en los estratos más profundos, puede deberse a un efecto residual del subsolado, el cual fue solamente realizado en las subparcelas que posteriormente fueron cinceladas.

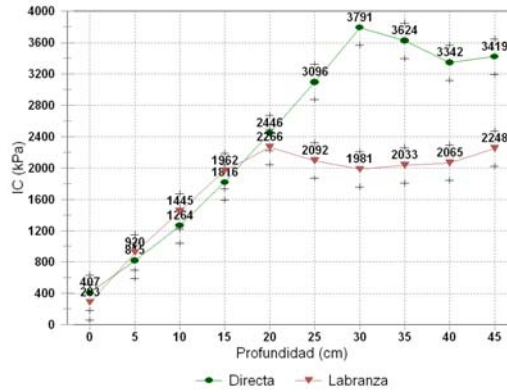


Figura 13: Interacción tratamiento * profundidad en la media loma (B II).

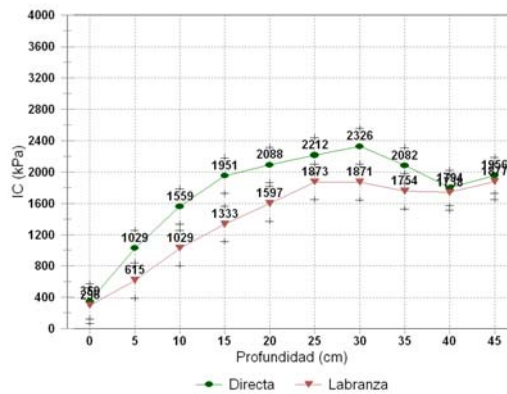


Figura 14: Interacción tratamiento * profundidad en el bajo (B III).

Del mismo modo podría especularse con que una mayor permeabilidad en la capa superficial del suelo, a consecuencia del cincelado, podría haber favorecido la captación de agua en presencia de pendiente y contribuir así a alcanzar un mayor contenido de humedad en profundidad y reducir la resistencia a la penetración en este estrato. Trout (1992) sostiene que la relación entre rugosidad superficial, pendiente e infiltración debe ser tomada en cuenta ya que afecta la velocidad de infiltración del agua y la profundidad de acumulación. Si bien no se descarta esta explicación, se la considera poco probable debido a que en el momento del muestreo, las diferencias en el contenido de humedad del suelo en el BII entre los sitios labrados y no labrados, se mantuvieron en el orden del 1 % y siempre a favor de los primeros. En el bajo (BIII), dichas diferencias fueron algo mayores, del orden del 2% y al igual que en el caso anterior, el contenido de humedad fue siempre superior en los sitios labrados. Puede percibirse al comparar ambas figuras, la similitud que presenta la resistencia a la penetración de los sitios laboreados en el bajo y

en la media loma, lo cual se contrapone marcadamente con lo observado en los sitios no disturbados.

En lo que respecta a los primeros veinte centímetros de suelo, el efecto de la labranza con cincel fue errático en la media loma (BII), pero se manifestó claramente en el bajo (BIII), donde se obtuvieron diferencias significativas en la resistencia a la penetración en todas las parcelas, principalmente en aquellas que recibieron el tratamiento de compactación (Figuras 15 y 16).

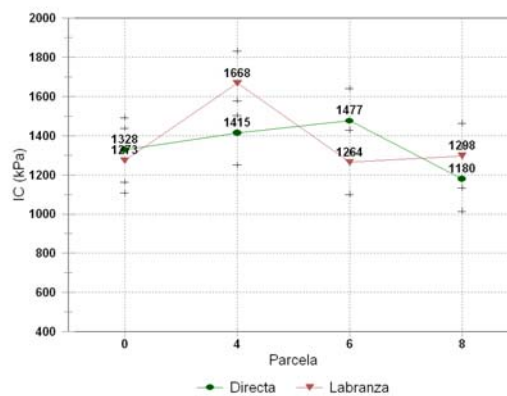


Figura 15: Interacción tratamiento * parcela en la media loma (B II). Rango de profundidad: de 0,00 a 0,20 m.

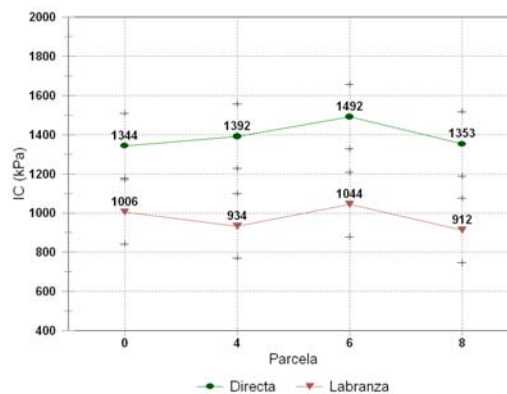


Figura 16: Interacción tratamiento * parcela en el bajo (B III). Rango de profundidad: de 0,00 a 0,20 m.

La resistencia a la penetración es un parámetro del suelo que normalmente presenta un elevado grado de variabilidad espacial y temporal. Resulta profundamente afectado por otras magnitudes físicas como la densidad aparente (Perumpral, 1987) y si bien Ayers y

Perumpral (1982) encontraron una relación directa entre índice de cono y densidad aparente, es notable el contraste existente entre los resultados obtenidos con aquél parámetro y los correspondientes a la densidad aparente analizados en el ítem anterior.

3.3. Rendimiento del cultivo

3.3.1. Trigo

El rendimiento del cultivo de trigo no presentó diferencias estadísticas por acción del cincelado ($F=2,06$; $Pr>F= 0,1768$) aunque el promedio obtenido con el tratamiento de directa superó al alcanzado con labranza (5140 y 4871 kg ha^{-1} respectivamente). Tampoco resultó afectado por el nivel de compactación (parcelas, $F=1,53$, $Pr>F= 0,2575$) ni por la posición del cultivo en el relieve (bloques; $F=0,83$; $Pr>F=0,459$). Sólo se detectó una interacción significativa entre el tratamiento de manejo del suelo y los bloques ($F= 8,49$; $Pr>F= 0,005$), ya que la existente entre el tratamiento y las diferentes parcelas alcanzó una $Pr>F= 0,2598$.

Tabla 1: Rendimientos medios de trigo (kg ha^{-1}) para cada bloque, parcela y tratamiento

Bloque	Tratamiento	Parcelas				Media Tratamiento	Media Bloque
		0	4	6	8		
I	Labranza	5328	4908	5250	4704	5047	5038
	Directa	4848	5670	4786	4812	5029	
II	Labranza	5934	5531	5397	4678	5385	5134
	Directa	5405	5289	4170	4673	4884	
III	Labranza	4126	3611	3960	5028	4181	4844
	Directa	5945	5624	4791	5665	5506	
Media Tratamiento	Labranza	5128	4683	4869	4803	4871	
	Directa	5399	5528	4582	5050	5140	
Media Parcela		5264	5106	4726	4927		5005

En lo que respecta a las parcelas, la diferencia mínima significativa fue superior a la existente entre el mayor valor alcanzado (parcela testigo, 5264 kg ha^{-1}) y el menor (parcela con 6 pasadas, 4726 kg ha^{-1}). Al realizar el contraste entre la parcela testigo y las parcelas 4, 6 y 8, se encontró que no existían diferencias significativas ($F=2,53$; $Pr>F=0,1376$), y al comparar las parcelas con menor intensidad de tránsito (testigo y

parcela 4) contra las más transitadas (parcelas 6 y 8) la probabilidad de indiferencia del rendimiento a la densificación se redujo al 8% ($F=3,66$; $Pr>F=0,08$).

Por otra parte, aunque la interacción entre los tratamientos y las parcelas no fue significativa ($F=1,52$; $Pr>F= 0,2598$), es destacable el hecho de que los rendimientos medios alcanzados por la directa siempre fueron superiores a los obtenidos mediante la labranza, salvo en el caso de la parcela 6.

Si bien los rendimientos no llegaron a ser estadísticamente diferentes entre bloques, en la tabla 1 puede apreciarse que la mayor producción de grano correspondió a los bloques I y II (5038 y 5134 kg ha⁻¹ respectivamente), mientras que el bloque III alcanzó los 4844 kg ha⁻¹. En principio, esta observación es llamativa debido a que es el bajo (BIII), el que suele tener los mayores rendimientos en los años de condiciones hídricas limitantes.

Sin embargo, al analizar el efecto del tratamiento dentro de cada bloque, se encontró que en la loma (BI) el rendimiento obtenido en directa (5029 kg ha⁻¹) fue prácticamente idéntico al alcanzado con labranza (5047 kg ha⁻¹). En la media loma (BII), se lograron rendimientos de 5385 kg ha⁻¹ y de 4884 kg ha⁻¹ con los tratamientos de labranza y de directa respectivamente ($t=1,54$; $Pr>t=0,1489$) mientras que en el bajo (BIII), la tendencia fue opuesta: 4181 kg ha⁻¹ con labranza y 5506 kg ha⁻¹ en directa ($t=4,08$; $Pr>t=0,0015$). En este último caso fue donde se obtuvo la mayor diferencia de rendimientos entre tratamientos mientras que, el escaso nivel de producción del trigo implantado con labranza, fue el determinante del bajo rendimiento general del bloque III.

El componente de rendimiento espigas m⁻² explicó gran parte de la producción de grano del cultivo. En el caso en estudio, esta relación alcanzó un valor de R² de 0.9918 ($Pr<0,0001$), utilizando una función cúbica sin ordenada al origen: $y = 8,1718 x + 0,01327 x^2 - 1,591 \cdot 10^{-5} x^3$ siendo "x" la cantidad de espigas por metro cuadrado (Figura 17).

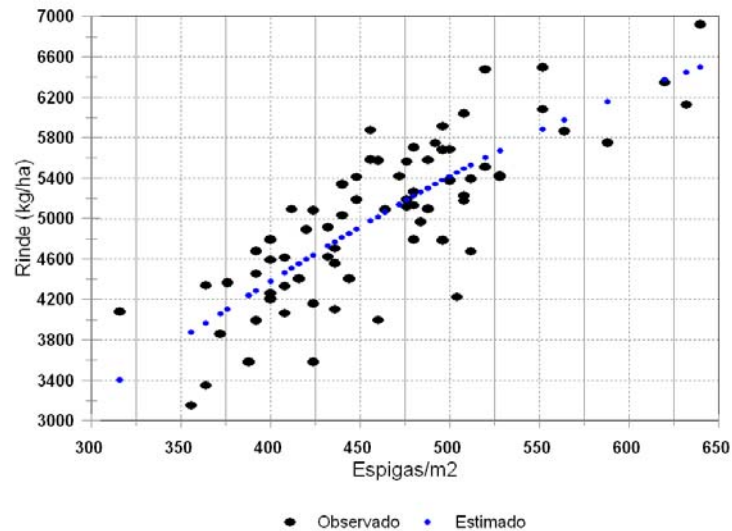


Figura 17: Regresión rendimiento en función de la cantidad de espigas por metro cuadrado.

En consecuencia, el análisis factorial de la población de espigas presentó resultados similares al realizado con el rendimiento, en lo concerniente a efectos principales e interacciones. La diferencia más notable fue que en los contrastes entre las parcelas más y menos compactadas, sí se alcanzaron diferencias significativas en la población de espigas, lo cual como se indicara anteriormente se vio reflejado en el rendimiento. Las parcelas menos compactadas (0 y 4 pasadas) tuvieron rendimientos medios mayores que las de 6 y 8 pasadas.

3.3.2. Maíz

En cuanto al cultivo de maíz, los rendimientos promedios fueron notoriamente bajos, resultado de la fuerte sequía. Previo a la implantación, se contó con precipitaciones por un total de 221 mm, que empero no alcanzaron para satisfacer la demanda global, llegando a la implantación con un elevado déficit de humedad. Durante todo el ciclo se registraron precipitaciones por 204 mm.

Martellotto et al. (1999) determinaron los consumos de agua para maíz entre 566,2 y 759,2 mm con producciones entre 7300 y 10000 kg ha⁻¹ en ensayos realizados en la provincia de Córdoba. En lo que respecta a la zona pampeana, se puede resumir que utilizando datos históricos varios investigadores encontraron consumos con valores promedio entre 490 y 580 mm. Considerando esas demandas, el cultivo bajo ensayo se

desarrolló en un ambiente con un déficit aproximado de 300 mm, aunque teniendo en cuenta el promedio histórico de rendimiento, el déficit es aún mayor.



Figura 18: Vista del cultivo de maíz en etapas tempranas del desarrollo

Analizando los rendimientos promedio alcanzados, se encontró que existieron diferencias estadísticas en cuanto a la posición en el relieve ($F=25,61$; $Pr>F<00001$), siendo el bajo la situación mas favorable, con un rendimiento promedio de 7019 kg, frente a los 5927 y 4272 kg de los bloques II y I, respectivamente. También los tratamientos generaron diferencias significativas ($F=6,88$; $Pr>F=0,0116$). Los 5325 kg obtenidos con siembra directa quedaron por debajo de los 6153 kg alcanzados en los lotes cincelados.

Tabla 2: Rendimientos medios de maíz (kg ha^{-1}) para cada bloque, parcela y tratamiento

Bloque	Tratamiento	Parcelas				Media Tratamiento	Media Bloque
		0	4	6	8		
I	Labranza	5172	5272	2730	3126	4075	4272
	Directa	5784	4513	3903	3673	4468	
II	Labranza	7089	7625	6058	4643	6354	5927
	Directa	6965	5508	5746	3782	5500	
III	Labranza	9901	9067	7575	5579	8031	7019
	Directa	7184	4129	7183	5529	6006	
Media Tratamiento	Labranza	7387	7322	5454	4449	6153	
	Directa	6645	4717	5611	4328	5325	
Media Parcela		7016	6019	5532	4389		5739

Además, el grado de compactación también generó diferencias estadísticas ($F=11,96$; $Pr>F<0,0001$). Las parcelas con 8 pasadas de tractor obtuvieron el menor de los rendimientos promedio, 4389 kg, seguidas en escala creciente por las parcelas de 6, 4 y 0 pasadas (5532, 6019 y 7016 kg respectivamente).

Al momento de estudiar las interacciones estadísticas, se encontró que los tratamientos se diferenciaron entre sí dentro de los bloques ($F=4,89$; $Pr>F=0,0117$) y también dependiendo de las parcelas ($F=3,88$; $Pr>F=0,0146$). El bloque I (loma) presentó los menores rendimientos, aunque no se diferenciaron estadísticamente entre Labranza y Directa. Los mayores rendimientos fueron obtenidos bajo el sistema de Labranza en los bloques II y III con 6534 y 8031 kg, respectivamente.

Dentro de cada bloque, las parcelas Testigo fueron las de mayor rendimiento, si bien al diferenciar entre tratamientos, las parcelas con 4 pasadas de tractor y cinceladas superan a los testigos sin alcanzar diferencias estadísticas ($F=0,85$; $Pr=0,5411$).

Estos resultados contrastan con lo informado por Logsdon y Karlen (2004) quienes realizando mediciones de densidad aparente cada 20 mm y 100 mm no pudieron encontrar diferencias significativas o siquiera una tendencia que pudiera señalar un efecto de la compactación sobre el rendimiento en cultivos de soja y maíz.

Letey (1985) estableció que la resistencia mecánica del suelo es uno de los factores más importantes en el crecimiento de las raíces. Martino (1998) al reducir la resistencia a la penetración mediante el empleo del paraplow logró un aumento del 14% en la productividad en un cultivo de trigo. Las causas de este aumento fueron atribuidas a un mejor establecimiento del cultivo, mayor proliferación de raíces y un mayor número de granos por unidad de superficie, debido principalmente a mayor sobrevivencia de macollos y menor mortandad de espiguillas. Sin embargo en el presente trabajo la escasa respuesta del cultivo de trigo al tratamiento y al estado de compactación de las parcelas pudo deberse a que el ensayo se realizó bajo condiciones de escaso contenido hídrico. Dicha tendencia coincide con lo informado por Gaultney et al., (1982), quienes observaron que compactaciones severas en temporadas secas duplicaban los rendimientos en comparación con temporadas húmedas.

Consistentemente, Al-Adawi et al. (1996), reportaron que la compactación edáfica provocaba la mayor pérdida de producción en años con abundantes precipitaciones. En cambio en este ensayo, para el cultivo de maíz con grandes deficiencias hídricas, las parcelas compactadas resultaron ser las de menor rendimiento, contradiciendo lo explicitado por los autores antes citados.

4. CONCLUSIONES

La labranza con cincel resultó útil para reducir la densidad aparente ya que los mecanismos de resiliencia del suelo bajo estudio aún no han podido revertir la densificación del mismo generada nueve años atrás. Su efecto varió en función del estado del suelo y se prolongó durante todo el ciclo del cultivo.

La resistencia mecánica subsuperficial del suelo indica un prolongado efecto del subsolado. La persistencia de tal efecto puede estar relacionada con el manejo del suelo posterior a la labor.

El rendimiento del cultivo de trigo a diferencia de lo ocurrido con el maíz no presentó una respuesta definida a la mejor condición física del suelo generada por la labranza.

Las condiciones ambientales en que se desarrolló el cultivo de maíz pudieron favorecer que se manifestaran diferencias en cuanto a la posición en el relieve y entre los tratamientos.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Al-Adawi, S. S. and Reeder, R. C. 1996. Compaction and subsoiling effects on corn and soybean yields and soil physical properties. Transactions of the ASAE. V 39 (5). pp: 1641-1649.
- ASAE Standards. 1992. ASAE S.313.2 Soil cone penetrometer. St. Joseph, Michigan: ASAE. 611 pp.
- Ayers, P. D. and Perumpral, J. V. 1982. Moisture and density effect on cone index. Transactions of the ASAE 0001-2351/82. Presented as ASAE Paper Nº 81-1047. pp: 1169-1982.
- Batey, T. 1990. Control of compaction on the farm. A personal view. Soil Technol. V.3. pp: 281-291
- Bonel, B. A., Denoia, J., Costanzo, M., Giubileo, G., y Zerpa, G. 2004. Efecto de la labor de escarificado sobre un argiudol vértico bajo siembra directa continua. Cien. Inv. Agr. 31 (3): pp.187-196
- Ferreras, L. A., De Battista, J. J., Ausilio, A. y Pecorari, C. 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. Pes. Agropec. bras. Brasilia. 36. pp: 161-170
- Gaultney, L., Krutz, G. W., Steinhart, G. C. and Liljedahl, J. B. 1982. Effects of subsoil compaction on corn yields. Transactions of the ASAE 0001-2351/82. pp: 563-569.
- Hamza, M. A. and Anderson, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. Soil & Tillage Research 82. pp: 121-145.
- He Jin, Hongwen Li, Rasaily Rabi G., Qingjia Wang, Guohua Cai, Yanboa Su, Xiaodong Qiao and Lijinc, Liu. 2011. Soil properties and crop yields after 11 years of no tillage farming in wheat–maize cropping system in North China Plain. Soil & Tillage Research 113. pp: 48–54.
- Irurtia, C. B., y Mon, R. 2000. Impacto de la erosión hídrica en la producción de granos en suelos Argiudoles de la pampa ondulada. 11º International Soil Conservation Organization Conference-ISCO. 22 al 27 Octubre 2000. Bs. As.
- Letey, J. 1985. Relationship between soil properties and crop production. Adv. Soil Sci. 1: pp: 273-294

- Logsdon, S. D. and Karlen, D. L. 2004. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil & Tillage* 78. pp: 143-149
- Martelotto, E.; Salas, P.; Lovera, E.; Salinas, A. y Manzini, P. 1999. Módulo de capacitación, experimentación y transferencia de tecnología en riego suplementario. Proyecto de intensificación de granos. INTA Manfredi. Córdoba. p. 4-13.
- Martino, D.L. 1998. Alleviation of soil physical constraints in direct-seeding stems in Uruguay. Tesis Ph. D. University of Manitoba, Canada. 289 pp
- McGarry, D. 2001. Tillage and soil compaction. In:Garcia-Torres; Benites, L, Martinez-Vilela, J. (Eds). First Congress on Conservation Agriculture. 1-5 October, 2001. Madrid, Spain. Natural Resource Sciences. pp: 281-291
- Melero, S., Panettieri, M., Madejón, E., Gómez Macpherson, H., Moreno, F. and Murillo, J. M. 2011. Implementation of chiselling and mouldboard ploughing in soil after 8 years of no-till management in SW, Spain: Effect on soil quality. *Soil & Tillage Research* 112. pp: 107–113
- Michelena, R., Iruetia, C. B., Vavruska, F., Mon, R., Pittaluga, A. 1989. Degradación de suelos en el norte de la región pampeana. Publicación Técnica Nº 6 INTA Pergamino (PAC). 130 pp.
- Paredes, D., Roba, M. A., D'Amico, J. P., Romito, A., Florean, R., Cura, J., Tesouro, M. O. 2009. Labranza vertical: efecto sobre las propiedades físicas del suelo y el rendimiento del cultivo de soja (*Glycine max* L.) bajo diferentes grados de compactación. 6 pp. Disponible en: <http://inta.gob.ar/documentos/labranza-vertical-efecto-sobre-las-propiedades-fisicas-del-suelo-y-el-rendimiento-del-cultivo-de-soja-glycine-max-bajo-diferentes-grados-de-compactacion/>
- Paredes, D., Roba, M. A., Duro, S., D'Amico, J. P., Venturelli, L., Romito, A., 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. 19 al 22 de septiembre de 2007. pp:133-139
- Perumpral, J. V. 1987. Cone penetrometer applications. A Review. *Transactions of the ASAE* 30 (4). pp: 939-944.

- Raper, R. L., Reeves, D. W., Burt, E. C. 1998. Using in-row subsoiling to minimize soil compaction caused by traffic. *The Journal of cotton Science* 2. pp: 135-138
- Raper, R. L. and Schwab, E. B. 2009. Development of an in-row subsoiler attachment to reduce smearing. *Applied Engineering in Agriculture. American Society of Agricultural and Biological Engineers*. V 25 (4). pp: 495-503.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. 1990. Atlas de suelos de la República Argentina. Tomo I. Proyecto PNUD ARG/85/019. 731 pp.
- Soane, B. D. and 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 (SSSA). 1996. Glossary of Soil Science Terms. Madison, Wi. USA. 134 pp.
- Tesouro, M. O; Venturelli, L; Masiá, G; Fuica, A; Smith, J; Figueiro Aureggi, S. 2005. Evaluación de un accesorio escarificador para sembradoras de grano grueso: Resistencia del suelo a la penetración y rendimiento del cultivo. VIII Congreso Argentino de Ingeniería Rural. Villa de Merlo, San Luis. Noviembre de 2005. 20 pp. Publicado en CD N° ISBN 987-05-0139-7.
- Trout, T. J. 1992. Furrow flow velocity effect on hydraulic roughness. *Journal of irrigation and drainage engineering*. Vol. 118. (6), November/December, 1992. Paper N° 2061
- Unger, P. W. 1996. Soil bulk density, penetration resistance and hydraulic conductivity under controlled traffic conditions. *Soil & Tillage* 37. pp: 67-75
- Weisskopf, P., Reiser, R., Rek, J. and Oberholzer, H. R. 2010. Effect of different compaction impacts and varying subsequent management practices on soil structure, air regime and microbiological parameters. *Soil & Tillage Research* 111. pp: 65-74.

La presente publicación integra una serie de Informes Técnicos publicada por el Laboratorio de Terramecánica e Implantación de cultivos del Instituto de Ingeniería Rural. Estos informes tienen como finalidad poner a disposición de los profesionales oficiales y privados, la información generada en los trabajos de investigación llevados a cabo.



Ministerio de Agricultura,
Ganadería y Pesca
Presidencia de la Nación