

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA



Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Trabajo Final de Carrera

“Sistemas de labranza. Efectos sobre propiedades físicas del suelo”

Alumno: Gonzalo Cachón

Director: Ing. Agr. Roberto H. Balbuena

Área: Curso de Mecanización Agraria

Departamento: Ingeniería Agrícola y Forestal

Año: 2011

RESUMEN

La adopción de la siembra directa de cultivos y los procesos de intensificación de la producción agropecuaria conllevan riesgos de deterioro del recurso suelo. Se efectuaron ensayos en campo para evaluar la incidencia de diferentes sistemas de labranza sobre propiedades físicas del suelo. En el año 1995 se establecieron parcelas experimentales trabajadas con arado de reja y vertedera, cincel y siembra directa. En el año 2005 las parcelas trabajadas con cincel fueron sembradas bajo siembra directa y sobre los tratamientos definitivos arado de reja (AR) siembra directa sobre cincel (SDC) y siembra directa (SD) se midió la densidad aparente, resistencia a la penetración y humedad gravimétrica durante el ciclo del cultivo e infiltración al final del mismo. Además, se determinó la compactabilidad por el test de Proctor. El tratamiento SD tuvo mayor humedad gravimétrica a lo largo del ciclo del cultivo, principalmente en los estratos inferiores del perfil. La resistencia a la penetración en el sistema SD tuvo diferencias estadísticamente significativas con AR prácticamente en todo el ciclo del cultivo a nivel superficial, superando reiteradamente en distintos períodos los valores de 1,5 y 2,0 MPa, que retardan o limitan el crecimiento radical. La densidad aparente de AR resultó significativamente menor que SD y SDC, en el estrato superficial y hasta 0,25 m durante la totalidad del ciclo. La mayor capacidad portante del suelo bajo SD no resultó suficiente para limitar procesos de compactación inducida por tránsito a nivel subsuperficial. La máxima compactación Proctor para SD fue significativamente menor que AR, para el estrato superficial, pero el mismo presentó la mayor compactación relativa. La tasa de infiltración básica fue significativamente mayor para AR, en correspondencia con los principales indicadores físicos del suelo. El suelo bajo SD presenta mayor compactación a nivel superficial, que podría comprometer el normal desarrollo de los cultivos.

INTRODUCCIÓN

La intensificación de los sistemas de cultivo en la Argentina se aceleró en el transcurso de las dos últimas décadas. En la Región Pampeana esto trajo como consecuencia una reducción de la superficie cubierta con praderas semipermanentes y un crecimiento de las áreas dedicadas a las secuencias agrícolas anuales. Estos sistemas basados en una agricultura continua e intensiva corren un severo riesgo de pérdida de la producción, en el largo plazo, como consecuencia del deterioro del recurso suelo.

Una alternativa para disminuir el proceso de degradación del suelo, es implementar rotaciones adecuadas para cada situación. Otra alternativa es la utilización de labranzas conservacionistas como una forma de reducir o evitar los efectos negativos de la agricultura continua, tratando de restituir las buenas condiciones estructurales del suelo. Esta alternativa fue la que tuvo mayor adopción a través de un cambio en el sistema de labranza utilizado, con la adopción masiva de la siembra directa. Según los datos de AAPRESID (2006), la superficie agrícola bajo siembra directa en la Argentina cubría 2.000 ha en la campaña 1985/86, 300.000 ha en 1990/91, 2.970.000 ha en 1995/96 y 15.100.000 ha en 2001/02. Actualmente, casi 25.000.000 ha, alrededor de un 75% de la superficie bajo cultivo, se implantan bajo el sistema de siembra directa (AAPRESID, 2011). Estos cambios hacen necesario un análisis profundo de los efectos de los distintos sistemas sobre el recurso suelo para poder evaluar la sustentabilidad de los sistemas agropecuarios en el tiempo. El sistema de siembra directa tiene, en acuerdo con algunos informes, el potencial de incrementar la infiltración, reducir la escorrentía y aumentar la conservación del agua a través de la reducción de la evaporación. Estos efectos son el resultado de dos factores: 1) el rastrojo protege la superficie del suelo del impacto directo de la gota

de lluvia, reduciendo así el desprendimiento de las partículas de suelo y 2) la serie de intrincadas represas y diques de rastros formados por los residuos además frenan la velocidad a la cual ocurre el escurrimiento lo cual, a veces, reduce la capacidad de transporte de sedimentos del flujo de agua y adicionalmente limita la erosión del suelo. (Dickey *et al.*, 1985). Este efecto es menos importante a medida que aumenta la degradación del suelo. (Michelena *et al.*, 1996).

Existe información con resultados dispares con respecto al efecto de los distintos sistemas de labranza sobre las propiedades físicas y químicas del suelo. Si bien, las condiciones de suelo, la rotación de cultivos y el tiempo desde que se aplican las labores varían, numerosos autores concluyen que bajo siembra directa, se produce un incremento en la compactación, resistencia a la penetración y contenido de agua para la capa arable (Nesmith *et al.*, 1987; Mahboubi *et al.*, 1993; Chagas *et al.*, 1994). El incremento en la compactación podría restringir el abastecimiento de agua, aire y la disponibilidad de nutrientes (Oussible *et al.*, 1992).

En numerosos trabajos de investigación se menciona, para un amplio rango de tipos de suelo, un menor crecimiento vegetativo de los cultivos bajo siembra directa, en comparación con cultivos sembrados en suelos con algún laboreo (Cornish y Lymbery, 1987; Schmidt y Belford, 1994). Estos autores atribuyeron como causa principal de la reducción del crecimiento del cultivo a factores de suelo de índole físico y biológico. Por otro lado, como una consecuencia favorable de estos sistemas que dejan el rastrojo en superficie se encontró que hay un incremento en la proporción de carbono orgánico y en la estabilidad de los agregados (Mahboubi *et al.*, 1993; Chagas *et al.*, 1994).

Voorhees y Lindstrom (1984) sostienen que los suelos bajo siembra directa tienen menor porosidad total durante aproximadamente los primeros cinco años de iniciado el sistema y luego comienza a incrementarse hasta llegar a un estado de equilibrio. Los agregados de suelos bajo siembra directa, con el tiempo serían más porosos dado que contienen mayor proporción de restos orgánicos y canales como resultado de la actividad biológica.

A principios de la década del 70 se comenzó a difundir en la Argentina el uso de escarificadores de cinceles, procurando la roturación de capas compactadas de suelo, favoreciendo la acumulación de agua, el desarrollo de raíces, la conservación de rastrojo en superficie y la modificación de las propiedades edáficas (Silenzi *et al.*, 1996; Marelli y Arce, 1999). En la década del 80 por lo contrario, se adoptó mayoritariamente el uso de implementos de casquetes, en combinación con escarificadores, a expensas de los sistemas más antiguos y tradicionales. Además, los implementos utilizados en los sistemas convencionales de labranza, sobre todo las rastras de discos, provocan la desagregación del suelo y aceleran la oxidación de la materia orgánica; ocasionan, además, la aparición de capas de suelo pulverizado en la superficie para procurar una "cama apropiada" para las semillas y capas endurecidas en niveles más profundos, principalmente por el pasaje de tractores y máquinas agrícolas. Estas capas contribuyen a aumentar la degradación del suelo, limitando la penetración de las raíces, del agua y del aire, restringen la zona de nutrición de las plantas y por ende, disminuyen la capacidad productiva de los suelos.

Algunos de los efectos perjudiciales sobre el suelo atribuidos a la labranza con arado de reja y vertedera, y que pueden mencionarse como los de mayor importancia, son la eliminación de la cobertura del suelo, la aceleración en la descomposición de la materia orgánica, y la aplicación de elevadas presiones por el tránsito y los elementos activos de las herramientas de labranza. El primer factor tiene incidencia directa sobre el control de la erosión y sobre la evaporación de agua, e indirecta sobre la estabilidad estructural.

La pérdida de materia orgánica se encuentra asociada también a la reducción de la estabilidad estructural; mientras que suelos con estructura degradada, sometidos a las presiones del tránsito y de las herramientas de labranza serían susceptibles de sufrir compactación, como ha sido hallado por Demmi y Puriccelli (1987) y Miaczynski y Tschapek (1965) entre otros. La respuesta de los cultivos a los cambios en las propiedades físicas de los suelos provocados por las labranzas depende, entre otros, de los cultivos, de la longitud de la estación de crecimiento, de la cantidad de lluvia y de las propiedades del suelo (Senigagliesi y Ferrari, 1993; Griffith et al., 1986).

El estudio del movimiento del agua en el suelo también es de fundamental importancia. Los diferentes sistemas de labranza provocan una modificación diferencial de las propiedades físicas de los suelos, resultando particularmente afectadas las propiedades hidráulicas. Al respecto, Los infiltrómetros de disco a tensión (Perroux y White, 1988) presentan una incorporación creciente en los últimos años. Dicho proceso encuentra su justificación en una serie de ventajas que el instrumento posee, por encima de otros métodos, como puede ser el doble anillo. Filgueira et al. (2006) enumeran como ventajas del instrumento al hecho de ser de fácil transporte, el volumen de agua utilizado es pequeño, permite realizar mediciones a campo sin alterar la estructura original de los suelos, reducido costo y, fundamentalmente, debido a su diseño permite aplicar el agua a presiones menores que la presión atmosférica y de esa forma excluir algunos tamaños de poros de la distribución de tamaño total.

Entre los parámetros más ampliamente utilizados para evaluar los cambios en las propiedades físicas del suelo, asociados a los procesos de compactación de suelos, se encuentran la resistencia mecánica del suelo y la densidad aparente; además, resultan indicadores de los efectos sobre el desarrollo radical y el movimiento de agua y aire (Rivas, 1998).

La resistencia a la penetración es un buen índice para evaluar problemas de restricción en el desarrollo radicular de las raíces de los cultivos, por la presencia de capas compactas y/o baja porosidad. Esa resistencia no es propiedad particular del material, sino que es la suma de los efectos de diferentes características y propiedades, tales como densidad aparente, contenido de humedad, y resistencia al corte, las cuales, a su vez, son consecuencia de la distribución del tamaño de partículas, de la estructura, y de la composición mineral y orgánica presentes en el suelo. Su determinación es sencilla, rápida, y puede hacerse directamente sobre el terreno, permitiendo así realizar un alto número de mediciones que contrarrestan el problema de variabilidad espacial (Nacci y Pla Sentis, 1992).

Para evaluar el impacto de los sistemas alternativos de labranza sobre estas propiedades una buena herramienta es investigar el comportamiento de la infiltración del agua en el suelo. Se define a la infiltración del agua en el suelo como el proceso de entrada del agua al mismo (Kutilek y Nielsen 1994). Este proceso es fundamental para estudiar la recarga de agua en el perfil. A partir de la infiltración del agua, también pueden valorarse otras propiedades físicas, siendo los poros de mayor tamaño los que cumplen un rol destacado en la transmisión del agua y el movimiento de solutos al interior del perfil (Beven y Germann, 1982; Kutilek y Nielsen 1994). Tienen además importancia en el desarrollo de las plantas ya que es en ellos donde se produce el crecimiento de las raíces (Wang et al., 1986). Capowiez et al. (2009) observaron una correlación positiva significativa entre la tasa de infiltración constante y el número de poros con un diámetro efectivo mayor de 6 mm, determinados mediante análisis de imagen para sistemas de labranza reducida.

HIPÓTESIS:

- Los sistemas de labranza conservacionista permiten una mayor acumulación de humedad en el perfil del suelo durante la totalidad del ciclo del cultivo.
- Los sistemas de siembra directa presentan una mayor compactación a nivel superficial (dentro de los primeros 0,20 m de profundidad)
- Los sistemas de labranza conservacionista mejoran la infiltración del agua en los primeros estratos del perfil.
- Los suelos bajo laboreo de conservación presentan una menor compactabilidad bajo condiciones estandarizadas

OBJETIVOS:

Objetivo general:

- Evaluar la influencia de los sistemas de labranza sobre las propiedades físicas del suelo

Objetivos particulares:

- Determinar la incidencia de los distintos sistemas de labranza sobre la resistencia a la penetración, densidad aparente, humedad del suelo, infiltración y compactabilidad luego de transcurridos los primeros años del establecimiento de sistemas de conservación.

ANTECEDENTES

Cuando los sistemas de conservación y especialmente el de siembra directa se desarrollan en condiciones de escasas precipitaciones presentan en general una mayor disponibilidad de agua en el perfil del suelo, comparados con los sistemas con arado de reja y vertedera (Zeljovich y Ferrari, 1991). Erbach et al. (1986) compararon el sistema de labranza con arado de reja y vertedera respecto a la siembra directa y hallaron diferencias en el contenido volumétrico de agua de los primeros 0,2 m del suelo, durante los dos primeros meses a partir de la emergencia del cultivo, hasta 1,5 m de profundidad. Similares resultados fueron informados por Senigagliaesi y Ferrari (1993) en una rotación trigo-soja de segunda -maíz donde el contenido de humedad fue mayor para el sistema de siembra directa comparado con el sistema convencional durante casi toda la estación de crecimiento de maíz y soja en los cuatro años evaluados, y en 3 de los 4 años en el cultivo de trigo. En ese lapso de tiempo las diferencias estuvieron en el rango de 20-25% a favor de la siembra directa. Este mayor contenido de humedad, resulta particularmente importante en el cultivo de maíz en el período de floración, considerado crítico para la determinación del rendimiento (Robins y Domingo, 1953; Shaw, 1988 citados por Andrade et al., 1996)

Denton y Wagger (1992) señalan que en años secos la siembra directa está asociada a mayor recarga por mayor infiltración pero también a mayor secado por

mayor crecimiento vegetativo del cultivo, mientras que el sistema convencional está asociado a pérdidas de agua al realizar las labranzas. Ellos determinaron que la siembra directa tuvo generalmente mayor humedad volumétrica que el sistema con arado de reja y vertedera en suelo franco arcillo arenoso hallándose esas diferencias en el rango de 3 a 10 puntos de humedad. En suelos franco arenosos las diferencias fueron poco frecuentes y de aproximadamente 1,4 puntos.

En años con lluvias normalmente espaciadas las diferencias en el contenido hídrico de suelos bajo distintos sistemas de labranza desaparecerían, debido al efecto de reposición de las lluvias (Erbach et al., 1986). Radcliffe et al. (1988) trabajando sobre un hapludol típico franco arcillo arenoso, determinaron luego de 10 años que no existen diferencias de humedad gravimétrica del suelo entre sistemas de labranza, aunque la siembra directa tendió a mayor contenido que el sistema con arado de reja y vertedera.

Por otra parte en años húmedos Gayle et al. (1992), encontraron que la siembra directa tuvo menor porcentaje de agua en un suelo franco arcillo arenoso fino que el laboreo con cincel profundo. Los autores estimaron que podría atribuirse a una menor infiltración en siembra directa.

Senigagliesi y Ferrari (1993) alertan en cuanto a que la mejor condición física superficial de los sistemas conservacionistas puede ser insuficiente para permitir una adecuada infiltración de agua de lluvia, si ocurren eventos de alta intensidad, ya que en los argiudoles el factor limitante puede ser la baja permeabilidad del horizonte B. En estos casos sugieren que el uso de labranzas profundas podría colaborar en la reducción de esas limitaciones.

Es importante destacar que los diferentes sistemas de labranza y energías de compactación tienen un efecto diferencial sobre la modificación de los distintos rangos de tamaños de poros, siendo los más afectados los de mayor tamaño (Ankeny et al., 1991). Debido a que el mayor crecimiento radical se produce en éstos poros estas modificaciones sobre el sistema poroso aún cuando no sean de gran envergadura tienen un gran efecto sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos. Al respecto, Ferreras et al. (1996) analizaron los efectos de distintos sistemas de laboreo sobre la porosidad estructural, encontrando la existencia de interacción entre tratamientos y profundidades. Para las observaciones en superficie, la labranza vertical tuvo los valores más elevados (23,01%) y siembra directa los menores (8,77%). En la profundidad de 0,06-0,2 m, los valores más elevados correspondieron a no laboreado (11,71%) y los menores a siembra directa (4,09%), correspondiendo a labranza vertical un valor intermedio (9,17%).

Según diversos autores, cuando la compactación relativa supera el 86-90% (dependiendo de la textura del suelo), se produce una reducción importante de la proporción de macroporos, afectando al normal movimiento de los fluidos, lo cual se relacionaría a un menor crecimiento y rendimiento de los cultivos (Carter, 1990; Lipiec et al., 1991).

El mayor porcentaje de flujo de agua en el suelo también se produce sobre los poros más grandes. Aoki y Sereno (2004), confirmando esa idea, encontraron que con tensiones de -2 cm a -4 cm se producía una disminución del flujo de agua que fluctuaba entre 45% y 90% dependiendo del tratamiento considerado. Por ello, resulta de importancia el conocimiento de la evolución de la distribución de tamaños de poros en un suelo sometido a diferentes manejos.

Con respecto a los problemas de compactación del perfil, Håkansson y Danfors (1981) recomendaron, para evitar problemas a nivel subsuperficial, limitar la carga por eje a 6 Mg. En relación con esta problemática, Smith y Dickson (1990) concluyeron que es necesario reducir el peso total de los conjuntos tractor - apero, lo cual implica utilizar equipos más pequeños y, por lo tanto, aumentar el número de pasadas sobre

cada hectárea de terreno a trabajar. Van den Akker (1998) encontró que la inducción de compactaciones por tráficos con 32 kN en el eje puede mantenerse dentro del horizonte arable (Ap), utilizando rodados de mayor superficie de contacto rueda/suelo y una menor presión de inflado. Alakukku (1997) concluyó que, en condiciones de elevada humedad, el tráfico debiera reducirse al mínimo indispensable y los vehículos debieran portar ruedas que les permitieran limitar su presión de inflado a una máxima de 50 kPa.

En relación con el pasaje repetido, de tractores de baja carga/eje, Jorajuría y Draghi (2000), concluyeron que el pasaje repetido sobre la misma senda puede reemplazar al factor peso sobre el eje, en la responsabilidad de inducir compactaciones en el subsuelo. Botta *et al.* (2002) encontraron que la presión en la zona de contacto rueda/suelo puede influir en la compactación superficial, mientras que a una profundidad igual o mayor a 0,4 m, el peso sobre el eje, independientemente de la presión sobre el suelo es responsable del proceso de compactación. Según Bragachini (2006), los rodados de las máquinas cosechadoras deben tender hacia una menor presión de inflado para evitar la formación de huellas, lo cual se logra con neumáticos de gran superficie de contacto rueda suelo para reducir la compactación superficial.

En relación con la densidad aparente, Veihmeyer y Hendrickson (1948) determinaron que valores de $1,46 \text{ Mg.m}^{-3}$ constituyen el umbral crítico para el desarrollo radicular de gramíneas, mientras que Daddow y Warrington (1984) establecieron que $1,65 \text{ Mg.m}^{-3}$ es el umbral de crecimiento radical.

En cuanto a los efectos de los sistemas de labranza sobre la densidad aparente se encuentran resultados contradictorios. Algunos estudios muestran un aumento de la densidad aparente bajo siembra directa en relación a la labranza con arados (Tebrugge y During, 1999) o con laboreo reducido (Mc Vay *et al.*, 2006) como así también que diferentes manejos con labranzas limitadas pueden producir una densificación de los estratos superiores del suelo, comparados con los sistemas con intensos procesos de labranza (Rasmussen, 1999). Por lo contrario, en otras revisiones, los efectos de la labranza sobre la densidad aparente y la porosidad son inconsistentes (Strudley *et al.*, 2008). Algunos investigadores no han encontrado efectos significativos de diferentes sistemas de labranza en la compactación de los suelos (Ismail *et al.* 1995) y en su distribución vertical (Flowers y Lal, 1998). Por otro lado, Domínguez *et al.* (2000) han registrado una mayor acumulación de compactación superficial y una mayor capacidad portante en suelos bajo siembra directa. En el mismo sentido, Carter (1990) informó que los sistemas que no remueven el suelo pueden ayudar a la compactación del mismo. Álvarez y Steinbach (2009) encontraron incrementos en la densidad aparente y la resistencia a la penetración en la mayoría de los casos analizados en su estudio sobre ensayos efectuados en la región Pampeana, cuando los mismos fueron contrastados contra suelos arados, indicando que los procesos de densificación bajo siembra directa ocurrieron principalmente cuando la densidad aparente inicial del suelo era menor a $1,3 \text{ Mg.m}^{-3}$, mientras que el resto de las situaciones, con densidades mayores parecieron insensibles a los procesos de compactación. La densificación del suelo muestra un comportamiento diferencial en suelos de textura fina y gruesa, con mínimas o nulas variaciones sobre los suelos de textura gruesa. Tuda *et al.* (2006), analizaron los efectos de los sistemas de labranza sobre un suelo Haplustol éntico. Luego de 4 años de instalados los ensayos, encontraron que la densidad aparente de los estratos de 0-0,10 y 0,10 a 0,20 m correspondientes al suelo bajo SD fue significativamente mayor que la de los sistemas con remoción. Sin embargo, en las evaluaciones correspondientes a 10 años de ensayo la densidad de la totalidad del perfil hasta los 0,4 m de profundidad fue similar entre los distintos tratamientos para cada estrato. Álvarez *et al.* (2006a) evaluaron distintos manejos en suelos Argiudoles típicos de la Pampa Ondulada encontrando

que los suelos en SD no presentaron diferente densidad aparente que los de labranza convencional, diferenciándose ambos de los suelos en condición cuasi prístina. No obstante ello, los autores indican que los registros encontrados, $1,18 \text{ Mg.m}^{-3}$, se hallaban por debajo del valor de $1,45 \text{ Mg.m}^{-3}$, indicado por Taboada et al. (1998) como correspondiente a la máxima compactación posible de encontrar para este tipo de suelos. En cambio, Álvarez et al. (2006b) establecieron una respuesta diferente al manejo en Molisoles, con respuesta diferente a los tratamientos de labranza en los Udoles y en los Ustoles

Por otra parte, resultan más consistentes los resultados de los efectos de los sistemas de labranza sobre la resistencia a la penetración, con un generalizado incremento en los estratos superiores para los planteos bajo siembra directa, en comparación con los sistemas de labranza con arados (Tebrugge y During, 1999; López-Fando et al., 2007; Franzluebbbers y Stuedemann, 2008) y labranza reducida (Vetsch y Randall, 2002; Siri-Prieto et al., 2007; Vetsch et al., 2007). Es generalmente aceptado que valores de resistencia a la penetración de 1,5 MPa reducirían el crecimiento de las raíces, y de 2 ó más MPa lo impedirían (Treadgill, 1982). En cuanto a los efectos de la compactación superficial sobre la implantación de cultivos, Hadas y Stibbe (1977) indicaron que bajos niveles de emergencia se producen en condiciones de suelo muy seco, muy húmedo o muy duro y, en general, el proceso de germinación es más rápido y completo con densidades aparentes de $1,2 \text{ Mg.m}^{-3}$ o menores y con valores de resistencia a la penetración menores de 1,4 MPa. Por otra parte, el crecimiento de las raíces de maíz se afectaría por valores superiores a 1,3 y 2,0 MPa en las etapas iniciales y posteriores del ciclo del cultivo, respectivamente (Echeverría y Studdert, 2001). Estudios experimentales han demostrado también que la germinación, la elongación de las raíces, la elongación del coleoptile y la emergencia del trigo pueden ser afectadas con estrés con valores mayores a 3, 2,3, 1,7 y 0,8 MPa, respectivamente (Collis-George y Yoganathan, 1985). Al respecto, Finlay *et al.* (1994) entienden que para alcanzar mejoras en la implantación del cultivo, resulta conveniente la labranza por debajo de la profundidad de siembra.

Se ha encontrado que las sucesivas labranzas a través de los años con arados de reja, trabajando en muchos casos en condiciones no óptimas, puede ocasionar la formación de capas densificadas o pisos de arado, por debajo de la profundidad de labor (Mazzucco, 1979; Negi et al., 1980; Demmi y Puricelli, 1987; Swan et al., 1987). Por otra parte, el aumento de la densidad aparente de los suelos cultivados es atribuido al paso de rejas o discos sobre los mismos, pero principalmente al tránsito, que cubriría al menos una vez la superficie durante un ciclo completo de cultivo (Gaultney et al., 1982). Swan et al. (1987) consideran que el paso de la rueda por dentro del surco compacta el suelo por debajo de la profundidad de labor habitual.

La magnitud de los efectos de la compactación también varía en relación con aspectos texturales. En este sentido, es esperable que los efectos sean mayores en suelos con mayor porcentaje de limo total (5-50 μm) y/o de arcilla según Demmi y Puricelli (1987).

Los resultados indican que la máxima compactabilidad está inversamente relacionada con el contenido de carbono orgánico del suelo; esto es coincidente con lo encontrado por Pecorari et al. (1993) y Thomas et al. (1996). Los sistemas de labranza presentan características diferentes en relación con la incorporación y manejo de la materia orgánica del suelo. En planteos de siembra directa de cultivos suele producirse una mayor acumulación en los estratos superficiales asociada a una menor incorporación en profundidad de los residuos de cosecha (Unger, 1991; Apezteguía et al., 2000), respecto de los sistemas de labranza convencional. Al respecto, Aragón et al. (2000) realizaron un relevamiento sobre la compactabilidad y la humedad crítica de compactación de los suelos de la región Pampeana, abarcando una amplia gama de

texturas, encontrando también una fuerte correlación negativa entre compactación y contenido de carbono orgánico

Leiva y Hansen (1984) determinan en un ensayo de larga duración, que la siembra directa produce una mayor compactación del suelo. Ellos realizaron las mediciones en el mes de diciembre con un penetrómetro de impacto, encontrándose el suelo en ese momento con un contenido promedio de humedad del 15%. Este efecto fue mayor en el estrato de 0,05 a 0,2 m (hasta 2,7 MPa). A su vez la labranza con reja compactó en orden medio (1,75 MPa) y en el estrato de 0,2 a 0,25 m, mientras que la labranza con cincel no produjo compactación (1,2 MPa). La compactación ocurrió siempre por encima de los 0,2-0,25 m de profundidad, no más.

Según Rivas (1998) la resistencia mecánica del suelo sometido a la labranza mínima es mayor que bajo labranza convencional (incluye cinco pases de rastras), debido a que con ésta última el suelo se disturba, por lo que la resistencia a la penetración es menor. Con la labranza convencional se produce un incremento de la densidad del suelo a los 80 días, en comparación al momento de la siembra, lo que confirma que la densidad y la geometría de los poros son inestables en el tiempo.

Taboada et al. (1998) compararon sistemas de labranza sobre suelo franco arenoso y franco arcillo limoso. En esos ensayos la siembra directa contaba con cuatro años desde su implantación sobre lotes con 25 años de agricultura bajo el sistema convencional. Ellos concluyen que la siembra directa no afecta la densidad aparente, la compactación relativa ni la distribución de poros, pero sí presenta un aumento significativo de resistencia a la penetración en superficie, el cual no puede ser atribuido a compactación superficial sino a un endurecimiento (reacomodamiento y cementación de partículas) en ambos tipos de suelo. Sin embargo recomiendan para el suelo franco arcillo limoso, debido a su baja macroporosidad original, la aradura periódica o el uso del riego para evitar restricciones mecánicas a los cultivos.

Erbach et al. (1992), en ensayos sobre suelos franco-limosos y franco-arcillo limosos encuentran que la labranza con arado de reja a una profundidad de 0,2 m es la que más afloja el suelo en este estrato, manifestado a través del índice de cono y de la densidad aparente, pero es quien sufre la mayor recompactación posterior, por lo que al momento de la siembra presenta un grado de compactación semejante a otros tratamientos.

Soane et al. (1982) afirman también que los suelos bajo siembra directa adquieren con el transcurso de algunos años, un estado de precompactación que les permite soportar mejor los efectos del tránsito.

Hernández et al. (2000) estudiaron varios sistemas de manejo de suelos, obteniendo como resultado que el suelo tratado continuamente bajo la forma convencional (cuatro pases de rastra de discos cada año) tuvo menor porcentaje de macroagregados estables y en consecuencia una mayor tendencia a la autocompactación superficial, que las áreas tratadas con siembra directa o la sabana no labrada, por lo cual el objetivo de crear una mayor aireación en el suelo con la labranza se pierde rápidamente al humedecerse el mismo. La compactación, particularmente por debajo de la profundidad de 10-15 cm, tiene una influencia importante en el crecimiento del cultivo en condiciones de humedad. Gran parte de este efecto es asociado con la aireación limitada y la inundación resultante del deterioro estructural que restringe la dimensión, la continuidad y el volumen de la porosidad (Gómez et al., 1999).

Por otra parte, también resultan contrapuestos los resultados encontrados en diversos estudios de los efectos de los sistemas de labranza en la conductividad hidráulica y la tasa de infiltración básica, asociados, a veces, a mejoras en la agregación y con la conectividad y continuidad de los macroporos (Strudley et al.,

2008). En algunos casos se han encontrado incrementos en la tasa de infiltración bajo siembra directa (Nielsen et al., 2005; Steinbach y Álvarez, 2007), pero en otros la infiltración del agua fue mayor bajo laboreo convencional (Rasmussen, 1999). Estas inconsistencias pueden, en parte, atribuirse al momento de evaluación y los cambios que ocurren en estos parámetros con el paso del tiempo, puesto que la tasa de infiltración suele ser muy alta en el instante inmediatamente posterior a la operación de labranza, pero la misma disminuye rápidamente unas pocas semanas después, resultando luego mayor bajo siembra directa en relación con los suelos intensamente labrados.

Álvarez et al. (2009) evaluaron distintos manejos en suelos Argiudoles Típicos de la Pampa Ondulada encontrando que la infiltración tuvo una respuesta diferencial para los distintos manejos en las distintas clases texturales. En los suelos francos resultó mayor en siembra directa, mientras que en los suelos franco arcillo limosos y franco limosos la infiltración fue sustancialmente inferior para SD que para Labranza Convencional. Este comportamiento fue relacionado a la presencia de estructura de tipo laminar para los primeros estratos del suelo, que podrían relacionarse también a la ausencia de diferencias en densidad pero aumento del endurecimiento de dichos estratos

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en un establecimiento ubicado en el partido de Azul (36° 58' LS 59° 44' LO). El predio fue trabajado con arado de rejas y vertederas hasta el año 1994. A partir del año 1995 fue labrado y sembrado con tres tratamientos distintos: labranza convencional, labranza conservacionista y siembra directa.

El suelo del lote destinado al ensayo es clasificado como Phaeozen haplico según la WRB (ISSS, ISRIC, FAO, 1998) o Hapludol típico (SSS, 1999) con la siguiente descripción, al inicio de los tratamientos de labranza:

A_p (0-12 cm): Textura franco. Arcilla: 20,62%; limo: 40,87%; arena: 38,51% con 3,88% de materia orgánica. Estructura en bloques pequeños moderados. Raíces moderadas. Límite inferior abrupto y suave.

A₁₂ (12-16 cm): Textura franco. Arcilla: 22%; limo: 36,39%; arena: 43,78% con 3,93% de materia orgánica. Estructura en bloques medios moderados. Raíces moderadas. Límite inferior claro y suave.

B₁ (16-23 cm): Textura franco. Arcilla 22%; limo 31,22%; arena: 43,78%. Estructura en bloques medios moderados. Raíces moderadas. Límite claro y suave.

B₂ (23 cm-40 cm): Textura franco-arcilloso. Arcilla: 34,53%; limo: 33,59%; arena: 31,88%. Estructura en prismas medios fuertes, que rompen en bloques medios fuertes. Raíces comunes. Límite inferior gradual y suave

Durante el año 2005 se estableció en el mismo una modificación en los sistemas de labranza, estableciéndose 3 tratamientos: labranza primaria con arado de reja y vertedera (AR), siembra directa sobre parcela con nueve años de labranza primaria con escarificador de cinceles (SDC), y siembra directa (SD). Los dos primeros tratamientos se diferenciaron entre sí, hasta el año 2004, solamente por la labor primaria, teniendo en común una primera labor con rastra de discos para eliminar los surcos de escardillo del año anterior (según el cultivo antecesor) y las labranzas secundarias con las que se completó la preparación de la cama de siembra.

En el tratamiento con arado de rejas, se utilizó un implemento de 6 cuerpos de 0,355 m de ancho, a una profundidad de 0,20 m. El tratamiento con arado de cinceles se realizó con un escarificador de 7 arcos flexibles con separación de 0,35 m entre líneas de acción, intentando llegar a los 0,30 m de profundidad.

La labranza secundaria para el tratamiento de reja, consiste en una primera pasada con una rastra de discos de doble acción de 343 N/casquete y una segunda labor con la misma rastra en conjunto con una rastra de dientes posterior.

En el tratamiento de siembra directa se utilizó una máquina con 7 cuerpos de siembra con sistema mecánico monograno de dosificación de semilla, doble cajón fertilizador, y cuchillas delanteras. Los órganos abresurcos están constituidos por cuchillas dobles, con doble rueda limitadora de profundidad. Los órganos de tapado del surco constan de ruedas dobles con banda maciza de caucho.

La siembra se realizó en el mes de octubre con una densidad de 84000 semillas.ha⁻¹, y el cultivo fue fertilizado con una dosis de 100 kg.ha⁻¹ de fosfato diamónico.

En el tratamiento de siembra directa se efectuó, previo a la misma, una aplicación de herbicidas de control total, utilizándose glifosato (48%) y 2,4 D (98%) en dosis de 3 y 0,5 l.ha⁻¹ respectivamente de producto comercial.

Para el control de malezas, nueve días luego de la siembra se aplicó sobre el total del ensayo un tratamiento con herbicidas. Se usó atrazina (46%), 2,4 D y Tordon. Cuando el cultivo alcanzó el estado V5 se incorporó una dosis de 135 kg/ha de urea y se realizó una segunda pulverización aplicando 1l/ha de MCPA.

El estado físico del suelo y su evolución a través de la fase vegetativa del ciclo de cultivo se valoró a través de mediciones de resistencia a la penetración, densidad aparente y humedad. Estas mediciones se hicieron en cuatro momentos: siembra, floración, madurez y postcosecha.

Para las determinaciones de resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de cono bajo norma ASAE S 313.2. (ASAE, 1993). En cada instancia de medición se efectuaron diez repeticiones por cada parcela, desde la superficie del terreno y hasta los 0,6 m de profundidad a intervalos de 0,0254m. Las determinaciones al momento de la siembra del cultivo se hicieron sobre la línea de siembra, mientras que en las restantes épocas de medición se efectuaron en forma aleatoria sobre el terreno.

Las determinaciones de densidad aparente, se hicieron por medio de una sonda Troxler 3440 de radiación gamma, cada 0,05 m de profundidad y hasta los 0,25 m, en las mismas instancias de medición de la resistencia a la penetración, efectuándose 2 determinaciones en cada parcela.

Las mediciones de humedad se realizaron sobre muestras de suelo obtenidas por medio de un barreno, con intervalos de medición de 0,20 m hasta los 0,6 m de profundidad. A partir de la medición de humedad gravimétrica se efectuarán las correcciones de densidad aparente en húmedo de la sonda Troxler 3440, para su expresión como densidad aparente en seco.

Al final del barbecho posterior a la cosecha del cultivo y previo a la implantación de un nuevo cultivo de verano se realizan mediciones de infiltración con el infiltrómetro de disco a tensión (Perroux y White, 1988). Se aplican con el mismo 2 tensiones (0 y -0,05 m) a los efectos de discriminar los poros que actúan en el proceso de infiltración de acuerdo a distintos potenciales negativos de suministro de agua al disco en contacto con el suelo. Es decir, es posible excluir poros en el proceso de infiltración de agua en el suelo. A partir de la ecuación de capilaridad se calculará el radio de poro correspondiente a una determinada tensión de aplicación de agua:

$$r = -\frac{2.\sigma.\cos\alpha}{\rho.g.h} \cong -\frac{0,15}{h} \quad (1)$$

Donde σ es el coeficiente de tensión superficial del agua [m s^{-2}], α es el ángulo de contacto entre el agua y la pared del poro [$^\circ$], ρ es la densidad del agua [kg m^{-3}], g es la aceleración debida a la gravedad [m s^{-2}], y h es la altura de columna de agua equivalente [m] en el infiltrómetro de disco a tensión. Utilizando este análisis se verifica que realizando las determinaciones sin tensión todos los poros del suelo participan del flujo, mientras que utilizando un potencial agua de $-0,05$ m el máximo tamaño de poros es de radio $0,3$ mm. Para esta determinación, se establecen 4 sitios, por bloque y labranza, distribuidos al azar. Se despeja el suelo de su cobertura vegetal y sobre el suelo desnudo se coloca una fina capa de arena con el objeto de aumentar el contacto hidráulico entre el instrumento y la superficie. Los ensayos de infiltración se prolongan hasta que el estado estacionario sea alcanzado.

Se analizará también la disminución del flujo, en porcentaje, debido a la aplicación del potencial de $-0,05$ m según la expresión 2

$$\Delta\% = \frac{I_0 - I_{5cm}}{I_0} \quad (2)$$

donde I_0 es la infiltración Básica sin la aplicación de potencial e I_{5cm} es la infiltración básica con la aplicación del agua con $-0,05$ m.

Al finalizar la toma de datos en campo se extrajeron muestras de suelo de cada uno de las repeticiones de cada tratamiento a los efectos de determinar el grado de compactabilidad en acuerdo con la metodología de Proctor Standard (1933) según la Norma IRAM N° 10511 (1972)

Se utilizó como diseño un modelo de bloques al azar. Cada uno de los 4 bloques tuvieron 90×70 m. Dentro de estos se ubicaron los 3 tratamientos sobre parcelas de 30×70 m. La superficie total ocupada con parcelas fue de 25200 m^2 , mientras que la superficie total, incluidas una calle central y cabeceras alcanzó a 39600 m^2 .

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitaciones

En el gráfico 1 se visualizan las precipitaciones ocurridas en el período del ensayo comprendido entre el inicio de las labores en el año 2004 y el final de las determinaciones efectuadas en el año 2005, las cuales totalizaron 915,1mm.

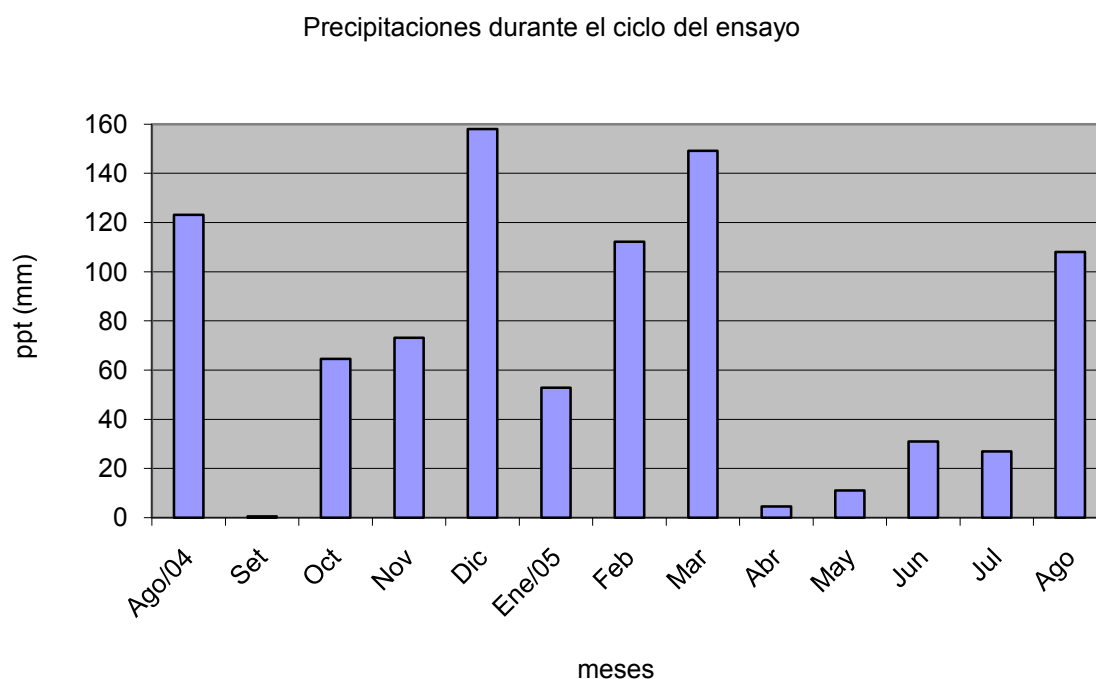


Gráfico 1. Precipitaciones durante el ciclo del cultivo. Agosto de 2004-Agosto de 2005. Estación Agrometeorológica de Azul 2005.

En el gráfico 2 se observa el promedio de precipitaciones acontecido en el período 1994-2001, las cuales alcanzan 860 mm anuales. Analizando la información presentada, surge que el año en análisis no resultó diferente en líneas generales a las medias históricas. Sin embargo, comparando estos valores con los promedios referentes al período 1996-2001 para los meses de octubre-enero, es posible observar que en la campaña que se está analizando se produjeron menores precipitaciones, pero las diferencias promediaron los 20mm en total. Las mayores diferencias se encontraron en el mes de enero, en el cual se registraron 48,6 mm menos que la media del quinquenio citado.

Promedio de precipitaciones 1996-2001

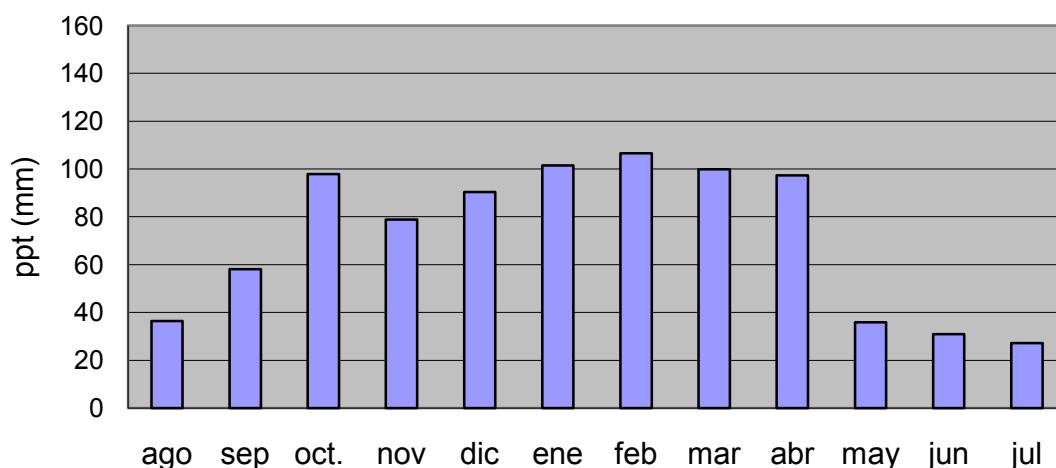


Gráfico 2. Precipitaciones correspondientes al quinquenio 1996-2001. Estación Agrometeorológica de Azul 2005.

Por lo expuesto, las particularidades de las precipitaciones durante el ciclo del ensayo podrían establecerse básicamente en la distribución a lo largo del año en general, pero específicamente durante el período cercano a la floración del mismo, tal como puede visualizarse en el gráfico 3.

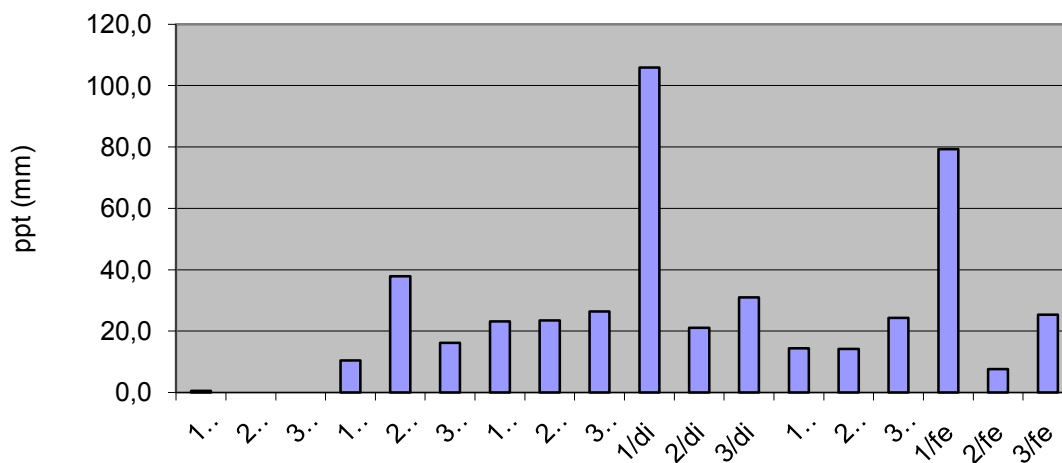


Gráfico 3. Precipitaciones decádicas para el período setiembre de 2004 - enero de 2005

Esta distribución de las precipitaciones también ayudó a la aparición anticipada de déficit hídricos, a partir de la primera semana de diciembre, que produjo un período de sequía de aproximadamente 40 días, puesto que no se produjeron nuevas precipitaciones de importancia durante la primera quincena del mes de enero, la cual totalizó solamente 52 mm. Esto habría resultado determinante tanto de la humedad gravimétrica del suelo, como del estado mecánico del mismo.

Humedad del suelo

En el gráfico 4 se visualiza el porcentaje de humedad gravimétrica hallado en el inicio de las labores para los diferentes sistemas de labranza correspondientes a los estratos del perfil del suelo de 0-0,20m, 0,20 a 0,40m y 0,40 a 0,60 m de profundidad.

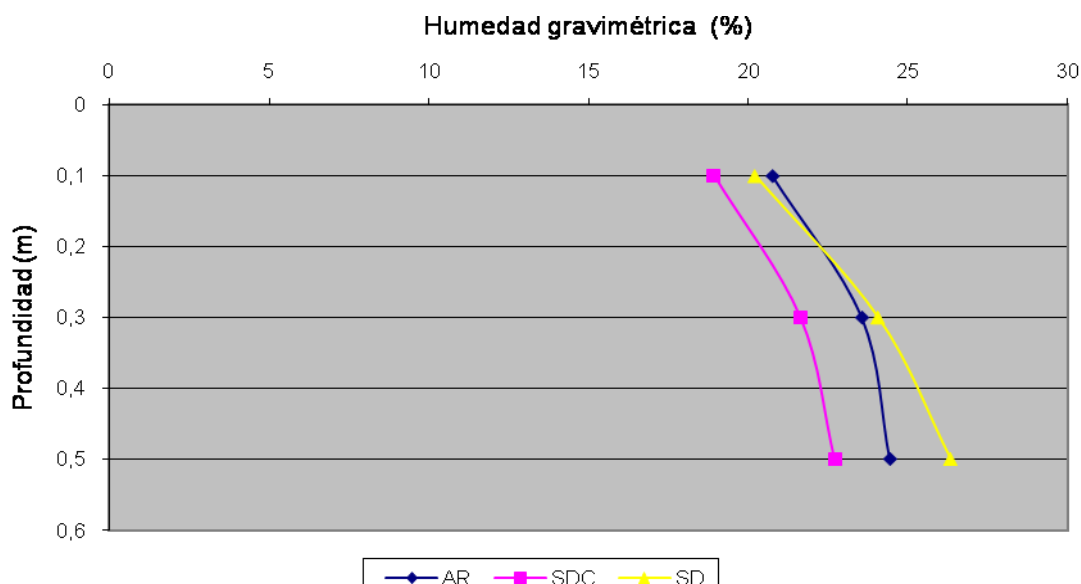


Gráfico 4. Humedad gravimétrica del suelo en porcentaje para los distintos tratamientos de labranza al inicio de las labores. Azul, octubre de 2004

Para esta instancia de medición a principios del mes de octubre se encontraron diferencias significativas entre las parcelas correspondientes al tratamiento con arado de reja y vertedera y el tratamiento bajo SD sobre terreno previamente cincelado y altamente significativas entre SD y SD sobre terreno previamente cincelado, mostrando SD la mayor media para las profundidades analizadas en conjunto, luego le siguió AR mientras que SD sobre terreno previamente cincelado tuvo los menores valores. Cabe aclarar que estas mediciones se tomaron antes de iniciar la labranza y el mayor valor para SD se registró a la mayor profundidad, sin que existan mayores diferencias entre este tratamiento y el de arado de reja y vertedera en los estratos de 0-0,20 m y de 0,20 a 0,40 m de profundidad. La mayor humedad de la SD podría explicarse en parte por un mayor porcentaje de materia orgánica lo que ocasiona una mayor retención de la humedad; a su vez, la mejor estructura del suelo contribuiría, en función de una mayor continuidad de macroporos en profundidad, como consecuencia de los bioporos producidos por las raíces de los cultivos anteriores, a una mejor infiltración en profundidad. A ello podría haber colaborado también la acumulación de residuos de cosecha de años anteriores para el mencionado sistema de labranza. En los restantes tratamientos un efecto residual de las labores podría estar ocasionando también una mayor aireación que favorecería una mayor evapotranspiración. Resulta interesante resaltar, que no se visualiza en la distribución de la humedad en el sistema de labranza con arado de reja y vertedera la presencia de un piso de arado, que limite la infiltración.

Por otra parte, el tratamiento de SD sobre terreno cincelado muestra semejanzas en la distribución de humedad con el sistema de arado de reja y vertedera pero con menores valores en todas las profundidades evaluadas.

Comparando las distintas profundidades analizadas se observaron diferencias altamente significativas entre 0-0,20 y 0,20-0,40 y entre 0-0,20 y 0,40-0,60 m, hallándose en todos los tratamientos los menores valores a la profundidad de 0 a 0,2 m sin que se evidencie interacción entre tratamientos y profundidades, lo cual podría deberse al mayor efecto de la evapotranspiración en dicha profundidad.

En cuanto a los menores valores del tratamiento previamente cincelado, contradicen los antecedentes que reportan mayores posibilidades de acumulación de humedad para este sistema, al menos un año después de haberse realizado las labores (Chagas et al., 1994). Por otra parte, esto implicaría que la labranza con cincel, en más de un pasaje para alcanzar la profundidad final de labor, no garantizaría para este tipo de suelo el mantenimiento de la modificación de la estructura, producto de la labranza por más de un ciclo de cultivo. Si se entiende a la capacidad de acumulación de agua en el perfil como un indicador indirecto del estado estructural del suelo, podría inferirse que el trabajo continuo con cinceles podría generar en el largo plazo una peor condición física del mismo

La humedad previa a la siembra parece adecuada para la realización de dicha labor, como así también para la labranza en el tratamiento de arado de reja y vertedera. Pese a ello, es de esperar que de no producirse precipitaciones después de la labranza, el porcentaje de humedad disminuirá en mayor medida para este tratamiento en relación a los tratamientos sin remoción, tal como puede observarse en el gráfico 5, correspondiente a la humedad gravimétrica al momento de la siembra.

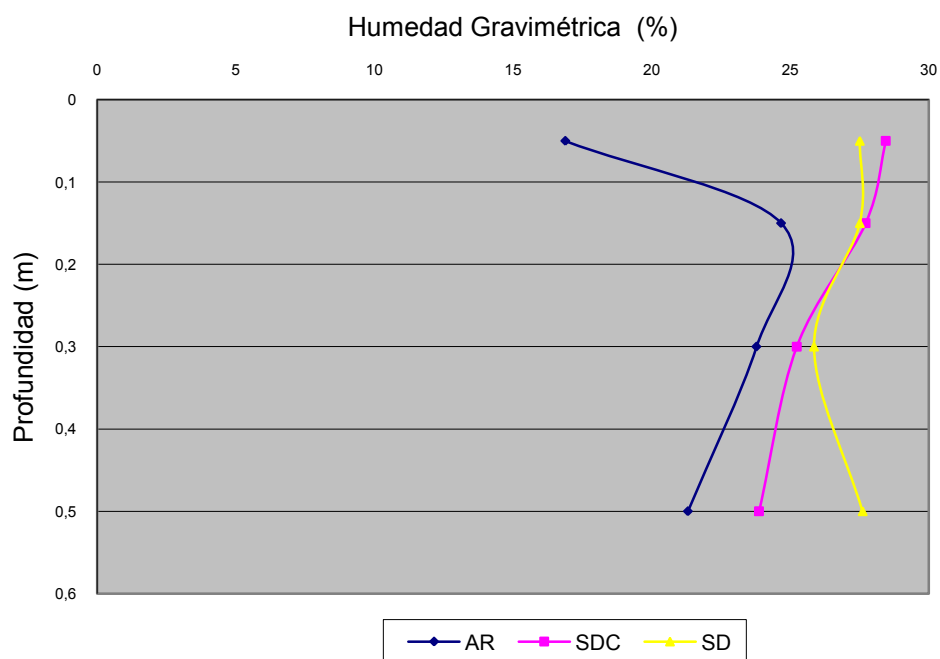


Gráfico 5. Humedad gravimétrica, en porcentaje, al momento de la siembra para los diferentes sistemas de labranza.

En esta instancia de medición, los registros se tomaron en forma similar a la anterior, pero incorporando una medición más, producto de la partición del primer estrato de 0 a 0,20 m en uno de 0 a 0,10 m y otro de 0,10 a 0,20 m a los efectos de cuantificar más precisamente la humedad a la profundidad de siembra del cultivo. El análisis de los resultados mostró diferencias altamente significativas entre arado de reja y vertedera y los tratamientos sin remoción.

La interacción entre tratamientos y profundidades fue altamente significativa por lo tanto se analizó cada profundidad en forma independiente. Las diferencias entre AR y SDC fueron altamente significativas para todas las profundidades, mientras que las diferencias entre AR y SD fueron significativas a nivel superficial (0 a 0,10 m) y altamente significativas para el resto de las profundidades.

El menor porcentaje de humedad en AR se podría explicar por la eliminación del rastrojo en superficie y la remoción del suelo, hasta aproximadamente 0,18-0,20 m de profundidad lo que aumentó la pérdida de humedad, pese a que las precipitaciones atemperaron el efecto citado. Los registros de humedad, a la profundidad de siembra, para este tratamiento, resultan preocupantes para cubrir los requerimientos de germinación y emergencia, de no mediar precipitaciones en forma inmediata; esto no sucede en los tratamientos sin remoción ya que los mismos presentan aceptables niveles de humedad en superficie y a su vez una distribución más uniforme en profundidad.

A diferencia de la medición anterior, no existieron diferencias entre SD previamente cincelada y SD lo que podría atribuirse en parte a la proximidad de las precipitaciones, como así también a la ausencia de remoción en el tratamiento SDC, lo que determina una mayor retención de la humedad por efecto de los residuos remanentes. Los resultados resultan coincidentes para este período con lo encontrado por Zeljkovich y Ferrari, (1991), Erbach et al. (1986), Senigagliesi y Ferrari (1993) y Denton y Wagger (1992) y podría explicarse por la mayor evapotranspiración ocurrida en el tratamiento con reja por no contar con rastrojo en superficie y por una menor retención de agua debida a la mayor aireación.

Los valores de humedad resultan en general adecuados, salvo a nivel superficial para el tratamiento AR en que los mismos se acercan al punto de marchitez permanente, mientras que en los tratamientos sin remoción estarían superando la capacidad de campo.

En el gráfico 6 se muestran los registros de humedad correspondientes a la medición efectuada en el transcurso de la primera semana del mes de enero, coincidente con el inicio de la floración del cultivo. El análisis de los datos relevados en dicha instancia no arrojó diferencias significativas entre tratamientos ni entre profundidades, como así tampoco se observó ningún tipo de interacción. Sin embargo pudo observarse que mientras AR mostró el menor valor para la profundidad de 0,40 a 0,60 m (10 % de humedad, aproximadamente), a esa profundidad el sistema bajo SD mostró el mayor valor que fue de 18% de humedad.

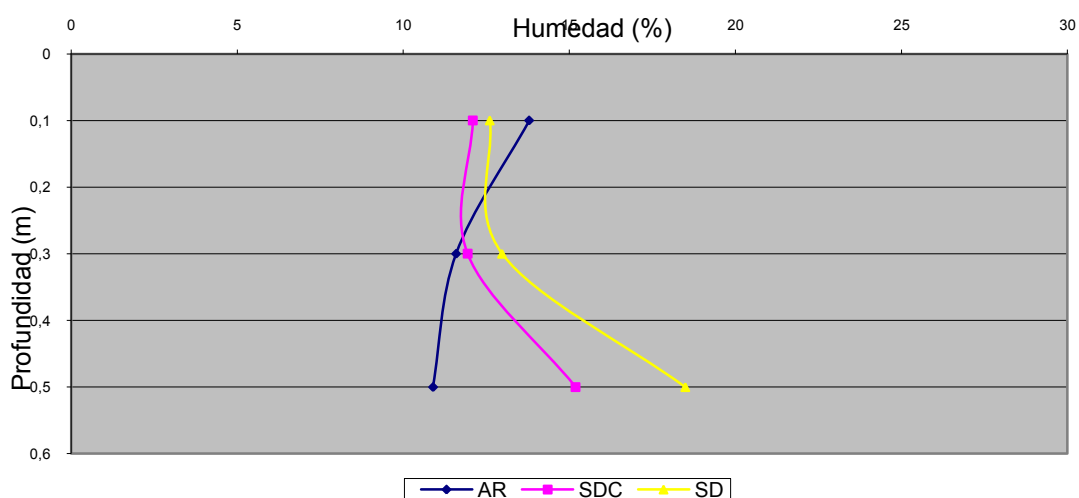


Gráfico 6. Valores de humedad gravimétrica al inicio del período de floración del cultivo para los diferentes sistemas de labranza

Visualmente, el cultivo en el sistema de arado de reja y vertedera demostraba un mejor desarrollo y estado general (fotos 1, 2 y 3), con visibles diferencias en altura, coloración y estado de las hojas, sin signos de stress hídrico. En cambio, en los tratamientos sin remoción del suelo, tanto en SD como en SD sobre cincel previo, era notable el acartuchamiento de las hojas y la menor altura general. Cabe destacarse, que el tratamiento bajo arado de reja y vertedera mostraba en esta fecha las primeras panojas, estableciéndose aproximadamente una semana de diferencia entre tratamientos con y sin remoción, para alcanzar similar estadio fenológico. La disponibilidad de humedad en esta fase del cultivo resulta importante por encontrarse en el período crítico (Robins y Domingo, 1953; Shaw, 1988 citados por Andrade et al., 1996), el cual determina el rendimiento del cultivo de maíz.



Foto 1 Estado del cultivo de maíz al inicio de floración bajo el sistema de arado de reja y vertedera



Foto 2. Estado del cultivo de maíz al inicio de floración bajo el sistema de Arado de reja y vertedera



Foto 3. Estado del cultivo de maíz al inicio de floración bajo el sistema de Arado de reja y vertedera

En cuanto a las limitantes hacia el cultivo por disponibilidad hídrica, todos los tratamientos muestran valores cercanos al 12% en superficie (0 a 0,20 m) aunque se observa una pequeña diferencia a favor del tratamiento con arado de reja y vertedera. En el sector de 0,20 a 0,40 m de profundidad también se registraron valores que podrían resultar limitantes para todos los tratamientos; la mayor diferencia entre los tratamientos se encontró entre los 0,40 y 0,60 m. donde SD presentó valores que no limitarían el crecimiento del cultivo, en tanto el tratamiento AR presentó la menor oferta hídrica. Por último, el tratamiento de SD sobre cincel presentó valores intermedios entre estos dos tratamientos.

En función de lo expuesto, el contenido de humedad del perfil del suelo, no alcanzó a satisfacer los requerimientos del cultivo, en esta etapa, para ninguno de los sistemas de labranza en estudio, o al menos no resulta aprovechable por el mismo. Estos tenores de humedad fueron el producto, tal como fue analizado en forma precedente, de un período de escasas precipitaciones acontecido a partir de la primera semana de diciembre en la cual se produjo el 67% de las precipitaciones acontecidas durante el mismo.



Foto 4. Cultivo de maíz bajo el sistema de siembra directa sobre cincel al inicio del período de floración

Por otra parte, resulta interesante analizar la evolución de la humedad presente en el perfil para los distintos tratamientos a lo largo del ciclo del cultivo. A partir de la realización del laboreo primario del suelo, puede observarse una importante reducción de la humedad del suelo para el tratamiento con arado de reja y vertedera a nivel superficial, pero que afecta en forma general a la totalidad del perfil bajo estudio. Aún más, las mayores diferencias entre tratamientos correspondieron a la mayor profundidad analizada. En función de la visualización del estado del cultivo, se podría hipotetizar que el cultivo pudo hacer en este tratamiento un mejor aprovechamiento de la humedad presente en los estratos inferiores del perfil en comparación con los tratamientos sin remoción del suelo. En cambio, el cultivo en los tratamientos sin remoción (fotos 4 y 5) no parece haber podido aprovechar la mayor humedad disponible en los estratos inferiores del perfil, en virtud del estado del mismo al momento de floración. Es decir, que los tratamientos sin remoción del suelo, no fueron capaces de ofrecer una mejor condición de humedad del suelo disponible para el cultivo, que permitiese, ante la ocurrencia de una sequía estacional prolongada, el aporte de agua suficiente para mitigar los efectos en mayor medida que los sistemas de laboreo convencional. Un aspecto que podría explicar este comportamiento sería que en los sistemas sin remoción, el sistema radical del cultivo de maíz habría encontrado una condición mecánica del suelo de alta impedancia, que limitó la exploración radical en profundidad, generando un sistema somero, incapaz de extraer agua disponible en profundidad.



Foto 5. Cultivo de maíz bajo SD al inicio de floración con signos de acartuchamiento de hojas

En virtud de lo indicado en relación con el estadio fenológico determinado en esta fecha, el rendimiento de la totalidad de los tratamientos se vería sumamente afectado por la ausencia de precipitaciones previas a la floración de cultivo.

En función de ello, para esta etapa de desarrollo del cultivo, no se observan coincidencias con lo expuesto por Zeljkovich y Ferrari (1991), en cuanto a que en años secos los sistemas de siembra directa presentan en general una mayor disponibilidad de agua en el suelo, comparados con los sistemas con arado de reja y vertedera. Los resultados también difieren de lo informado por Erbach et al. (1986) quienes determinaron un 20 a 25% más humedad en el sistema de siembra directa para los primeros 0,20 m de suelo. A su vez, Denton y Waggoner (1992) señalan que en años secos la siembra directa está asociada a mayor recarga por mayor infiltración pero también a mayor secado por mayor crecimiento vegetativo del cultivo. Sin embargo, esto no condice con lo observado en el cultivo, en esta etapa, donde se veía claramente un menor desarrollo vegetativo en el sistema de siembra directa (foto 5).

En cierta medida, los resultados muestran coincidencia con lo reportado por Radcliffe et al. (1988) sobre un Hapludol típico franco arcillo arenoso, puesto que no se encontraron en esta instancia (floración) luego de 10 años de ensayos con diferentes sistemas de labranza, diferencias de humedad gravimétrica del suelo. Por otra parte, las únicas diferencias consistentes a lo largo del ciclo del cultivo se obtuvieron para siembra directa en relación con arado de reja en profundidad

La comparación de los datos relevados el 11/05/05 (gráfico 7) arrojó diferencias altamente significativas entre el tratamiento de SD y el tratamiento de arado de reja y vertedera notándose un mayor valor de humedad para SD en todas las profundidades en comparación con el tratamiento de arado de reja y vertedera

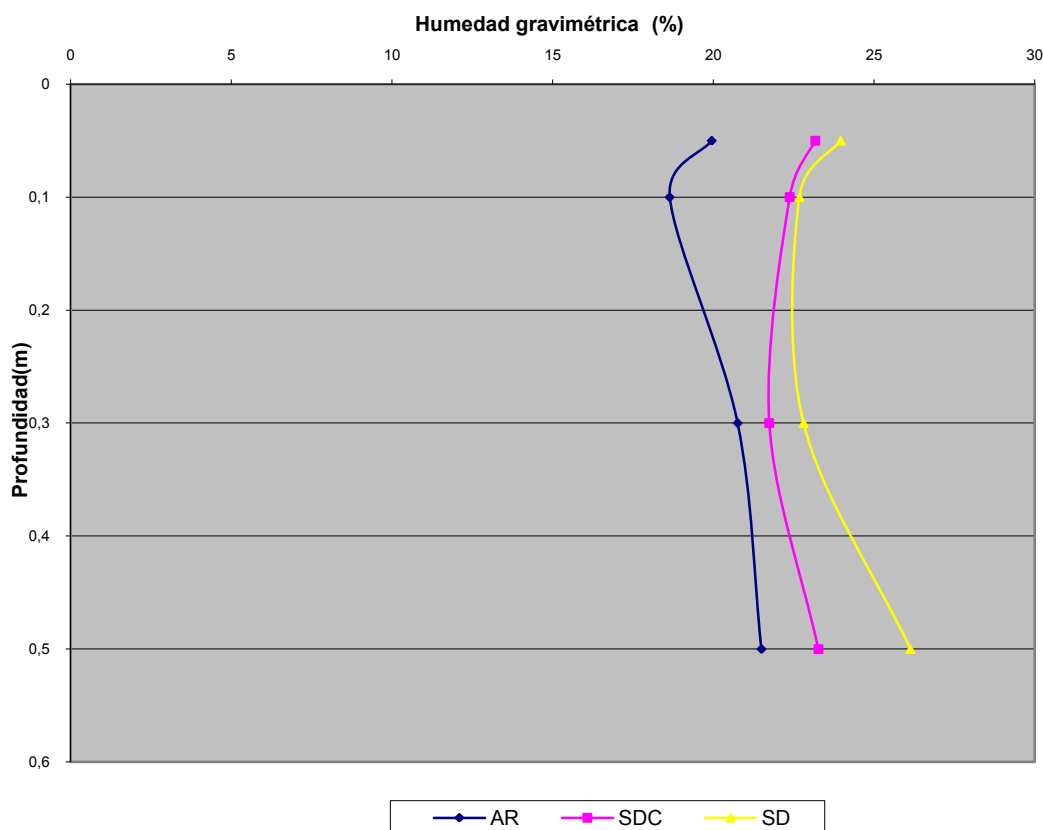


Gráfico 7. Humedad gravimétrica al momento de cosecha para los diferentes sistemas de labranza.

A nivel de los primeros estratos del terreno, los valores de humedad correspondientes al momento de cosecha implican que existan posibilidades de que se produzcan procesos de compactación inducida por tránsito a nivel superficial. La homogeneidad de la distribución de la humedad en el perfil del suelo correspondiente a los primeros 0,60 m podría causar también riesgos de compactación subsuperficial del suelo, en la medida que los vehículos que transiten el terreno presenten una masa/eje que supere los límites de 4 a 6 Mg indicados por Håkansson y Danfors (1981)

Se observa que para esta fecha ningún tratamiento presentó valores que resulten limitantes, para la eventual implantación de un cereal de invierno, posterior a la cosecha del cultivo, siendo los tratamientos sin remoción los de mayor contenido de humedad.

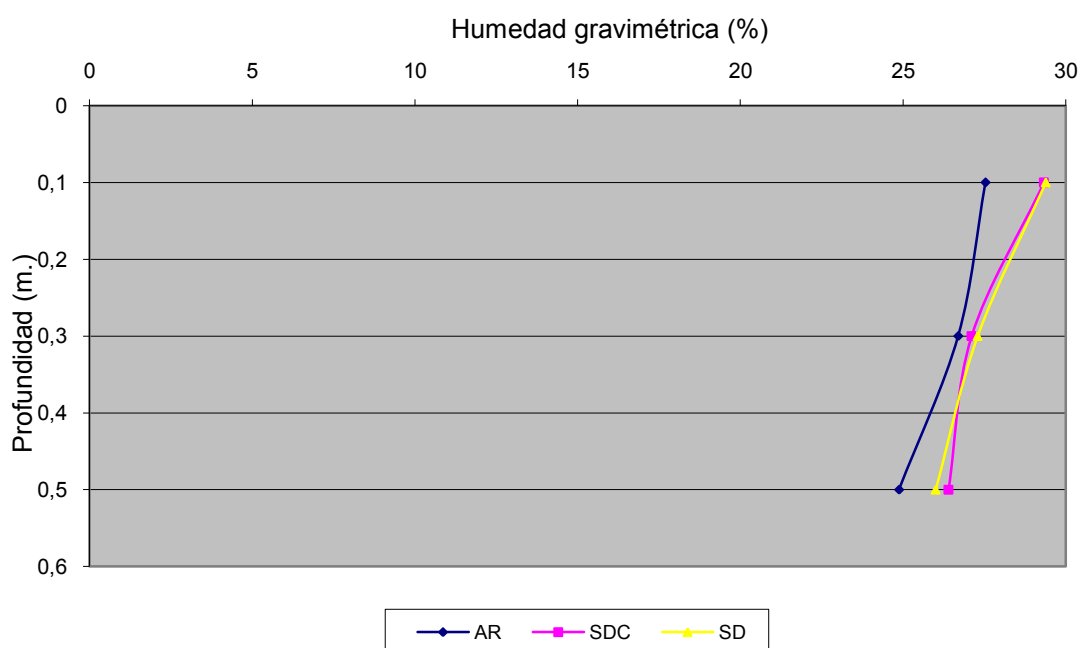


Gráfico 8. Humedad gravimétrica en el mes de agosto de 2005 para los diferentes sistemas de labranza.

El análisis estadístico realizado sobre las muestras extraídas el 18/8/05 mostró valores significativamente inferiores para el tratamiento AR y los tratamientos sin remoción cuando se analizaron la totalidad de las profundidades en conjunto; sin embargo, las diferencias entre tratamientos no superaron el 1,5 % (gráfico 8), lo que podría resultar consecuencia de la menor cobertura del terreno con residuos de cosecha, menor infiltración y acumulación de agua en el perfil bajo labranza convencional.

En un análisis general de los resultados obtenidos en las distintas fechas de medición, las diferencias encontradas entre los tratamientos favorecieron al sistema de siembra directa en el cual se encontró en general un mayor valor de humedad, lo cual resulta coincidente con lo encontrado por Zeljkovich y Ferrari (1991), Erbach et al. (1986), Senigagliesi y Ferrari (1993), Denton y Wagger (1992) y Radcliffe et al. (1988). La mayor retención de humedad por parte de este sistema se debería a que la

presencia del rastrojo en superficie actúa disminuyendo la evapotranspiración. Por otra parte, en las mediciones de octubre, enero y mayo, en el estrato de 0,20 a 0,40 m de profundidad, los tres sistemas de labranza tuvieron las menores diferencias entre los mismos, las cuales se incrementaron en el estrato de 0,40 a 0,60 m, correspondiendo los menores valores al tratamiento con arado de reja y los mayores al de SD. Otra cuestión interesante de considerar es la similar distribución de humedad a lo largo del perfil que presentan los tratamientos de SD y de SDC notándose en general un mayor valor para SD. Tampoco se encontraron coincidencias con lo reportado por Gayle et al. (1992), puesto que no se detectó un menor porcentaje de agua para el sistema de SD que para el de SDC. Esto podría ser explicado por las condiciones del año, relativamente seco, como así también por las características diferentes de suelo desde el punto de vista físico, producto de la degradación por compactación que afecta a la totalidad de los sistemas de labranza y en mayor medida a los tratamientos con historia de remoción periódica del suelo.

En función de la distribución de lluvias en la región en la cual se encuentra ubicado el ensayo, no se visualizan mayores beneficios para el sistema de siembra directa para la implantación y desarrollo de los cultivos invernales característicos de la misma. Además, la sequía que ocurrió entre los meses de noviembre y febrero, afectó severamente el desarrollo del cultivo de maíz, siendo en primera instancia visible en mayor medida en los tratamientos sin remoción del suelo, tal como se puede apreciar en las fotos 1,2 y 3. Esto indicaría que la eficiencia en la acumulación de agua en el perfil del suelo para los tratamientos sin remoción, no alcanzaría para atemperar los daños al cultivo, cuando las sequías son prolongadas. Por lo tanto, los beneficios del sistema en este aspecto estarían vinculados en mayor medida en relación con la conservación del suelo que con la mayor humedad del mismo.

Resistencia a la penetración

En el gráfico 9 se visualizan los valores de resistencia a la penetración previos a la realización de las labores.

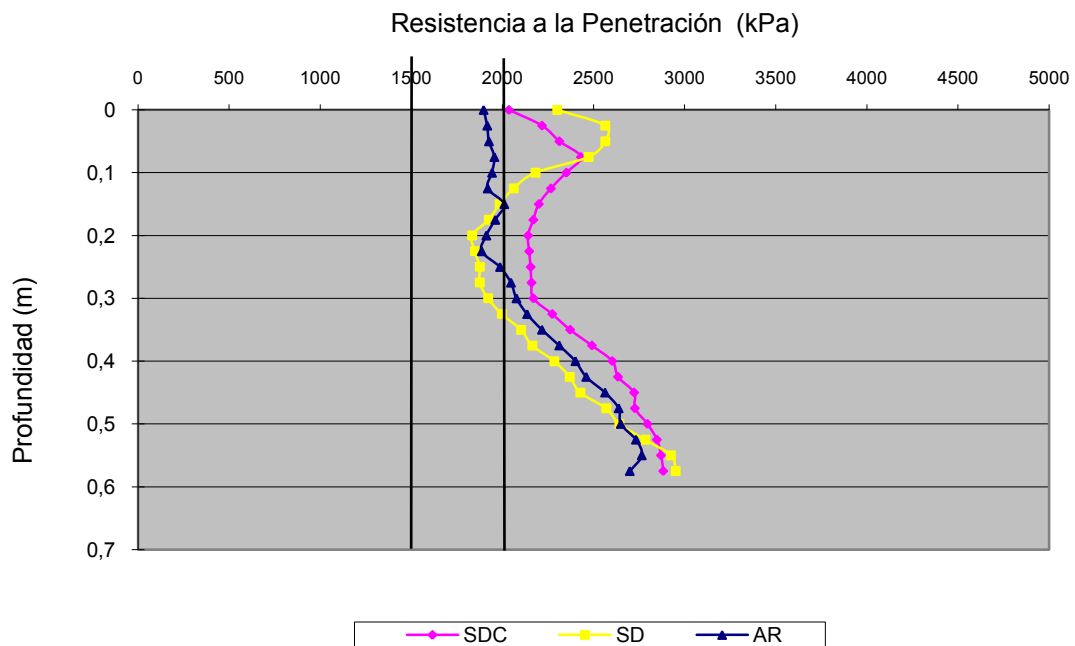


Gráfico 9. Resistencia a la penetración al inicio de las labores

Las mayores diferencias entre los tratamientos de labranza se encuentran a nivel superficial. Se observan diferencias estadísticamente significativas entre SD y AR desde 0,025 m hasta 0,075 m lo que podría deberse a los efectos residuales de la labranza con arado del año anterior y entre cincel y reja en 0,075 m y 0,10 m, sin observarse diferencias significativas entre tratamientos para el resto de las profundidades. Cincel muestra valores superiores a 2 MPa en todas las profundidades mientras que siembra directa lo hace de 0 m a 0,15 m y de 0,35 m a 0,575 m y reja lo supera de 0,275 m hasta 0,575 m donde no actúa el arado. En un análisis general de los datos de los distintos tratamientos de labranza, previo a la época de siembra poseen valores de resistencia a la penetración superiores a 1,5 MPa que pueden reducir el crecimiento radical para la totalidad de las profundidades evaluadas, según lo indicado por Treadgill (1982). Además, el sistema de siembra directa posee en la zona de siembra los mayores valores de resistencia a la penetración, en relación al resto de los tratamientos, superando el valor de 2 MPa que resulta limitante para el crecimiento radical. Resultados similares fueron informados por Leiva y Hansen (1984) y Taboada et al. (1998).

Por otra parte, en profundidad, no se visualizan efectos residuales de las labranzas realizadas en años precedentes con escarificadores de cinceles; la zona entre 0,2 y 0,3 m que diferencia la profundidad de trabajo habitual de las labores con arado de reja y cinceles se muestra similar. Tampoco se observa la existencia en el tratamiento de arado de reja y vertedera de una zona con una mayor resistencia, característica del piso de arado, al contrario de lo informado por Mazzucco (1979), Negi et al. (1980), Demmi y Puricelli (1987) y Swan et al. (1987). Es importante recordar que en la distribución de la humedad en el perfil del suelo para similar instancia de medición no era posible visualizar una discontinuidad en el perfil de la misma. Los valores de resistencia a la penetración para este tratamiento muestran a partir de esta zona un crecimiento gradual hasta prácticamente la profundidad final de medición

En acuerdo con los valores registrados, sería necesario lograr una reducción de la resistencia a la penetración para favorecer una adecuada germinación y emergencia del cultivo y lograr una correcta implantación del cultivo. Si bien un aumento de la humedad producto de precipitaciones podría reducir la RP, también es cierto que períodos de baja humedad pueden afectar por limitación mecánica al cultivo de maíz en sus primeros estadios. Teniendo en cuenta los valores de humedad registrados, cercanos al 20% (gráfico 4), podría afirmarse que el sistema sin remoción del suelo requerirá en forma permanente de altos valores de humedad del suelo, para no ocasionar limitaciones en el desarrollo radical.

Por lo expuesto se debería asegurar al menos la roturación del terreno en la zona en la cual se ubicará la semilla. La totalidad de las mediciones superaron el valor de 1,4 MPa, indicado por Hadas y Stibbe (1977) como limitante para penetrar agregados cuando el potencial de agua alrededor de la raíz disminuye de 0 a -1 MPa, puesto que disminuye en estas circunstancias la presión de Turgor del coleoptile y la fuerza ejercida sobre el suelo por el mismo. En función de los resultados obtenidos, la decisión de incorporar una cuchilla de corte y remoción de la línea de surco brindaría mayores posibilidades de una correcta implantación en los tratamientos sin remoción previa del suelo.

En el gráfico 10 se observan los valores de RP determinados el 27-10 combinando tanto los hallados en línea de siembra como en el entresurco. A nivel superficial, si bien se encontraron diferencias entre los distintos tratamientos de labranza y sectores de línea de siembra y entresurco, la interacción entre tratamientos y sectores alcanzó diferencias altamente significativas. La resistencia a la penetración en SD y SDC resultó mayor sobre el entresurco que en la línea de siembra, mientras

que para el tratamiento con reja y vertedera, la línea de siembra registró valores mayores a los del entresurco.

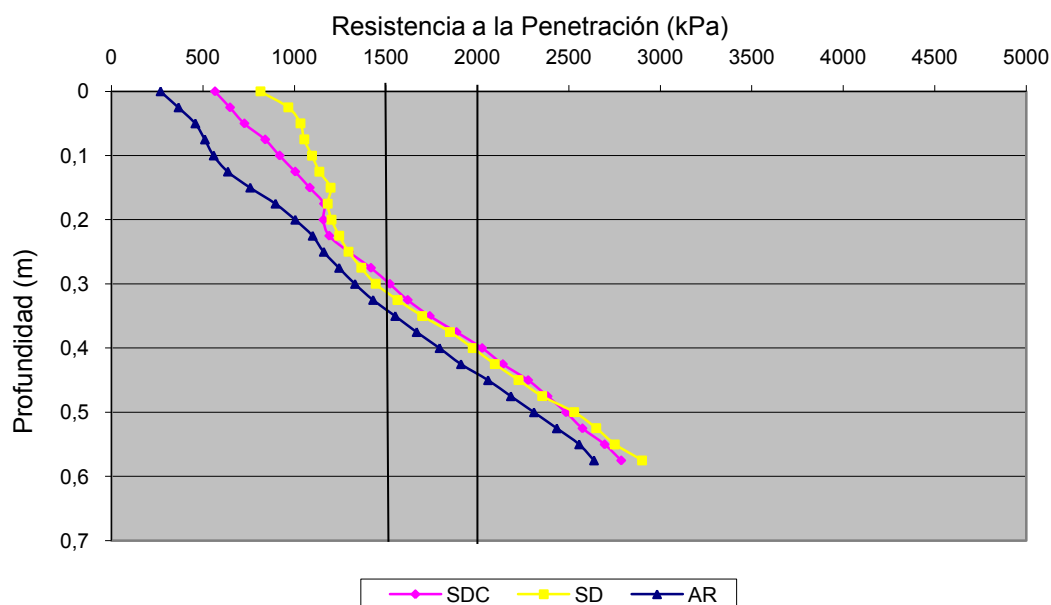


Gráfico 10. Resistencia a la penetración al momento de la siembra combinando los datos obtenidos tanto en línea de siembra como en entresurco.

Ese comportamiento diferencial se podría explicar en función de las características mecánicas del suelo al momento de la siembra, en relación con los efectos de los distintos órganos de la máquina sembradora. Es importante recordar que las ruedas del tractor transitan en el entresurco de las líneas 2-3 y 5-6, mientras que las ruedas de la sembradora se desplazan entre las líneas 1-2 y 6-7. Por lo expuesto, la disminución de la resistencia a la penetración en la línea de siembra para los dos tratamientos sin remoción pueden atribuirse al efecto de roturación de la cuchilla de corte y remoción "turbo" y eventualmente a la compactación del tractor y las ruedas de la sembradora. Sin embargo, sería de esperar que las diferencias se deban a la cuchilla. Teniendo en cuenta lo indicado por Botta et al. (2002), en relación con los procesos de compactación superficial y subsuperficial, difícilmente la presión en la zona de contacto rueda/suelo haya superado los límites para ocasionar compactación a nivel superficial. Por un lado la masa sobre el eje trasero del tractor, no resulta demasiado elevada, en función de la superficie de contacto rueda suelo para causar compactación a dicho nivel, puesto que el tractor utilizado para la siembra del cultivo poseía rodados 24,5*32. En este sentido, Bragachini (2006) indica que los rodados tienen que tener una baja presión de inflado, para reducir la compactación (a nivel superficial principalmente). Si bien el rodado utilizado no resulta demasiado alto, el ancho del mismo es muy superior al de los neumáticos modales para la masa del tractor utilizado. Cabe aclarar, que tampoco se superan los límites recomendados por Håkansson y Danfors (1981) para evitar problemas de compactación subsuperficial, de 6 Mg/eje. Pese a ello, vale recordar lo expuesto por Smith y Dickson (1990) quienes concluyeron que es necesario reducir el peso total de los conjuntos tractor - apero, lo cual implica utilizar equipos más pequeños y, por lo tanto, aumentar el número de pasadas sobre cada hectárea de terreno. En este contexto, en acuerdo con lo concluido por Jorajuría y Draghi (2000), con este tipo de tractor puede causarse compactación subsuperficial del terreno, toda vez que se produzca el pasaje repetido del rodado de los vehículos sobre la misma senda

Por otra parte, los mayores registros en AR para la línea de siembra podrían explicarse por el pasaje de las ruedas limitadoras de profundidad y el resto de los mecanismos de cierre del surco. A ello podría haber contribuido la preparación de la máquina sembradora para los distintos tratamientos. Al no modificarse la misma para el tratamiento con remoción del suelo el peso que se descarga sobre el tren de siembra para la penetración habría producido una mayor compactación del terreno a nivel superficial, al no brindar el suelo capacidad portante suficiente. De ser así, se puede haber afectado en este tratamiento la profundidad de siembra, como también el proceso de emergencia del cultivo.

Los análisis para 0,025, 0,05 y 0,075 m de profundidad muestran resultados similares a los encontrados a nivel superficial. El trabajo de la cuchilla hasta aproximadamente 0,10 m de profundidad podría explicar los efectos mencionados. A partir de dicha profundidad, no deberían atribuirse las diferencias a este elemento.

Por lo expuesto en los párrafos anteriores corresponde que se analicen los efectos en los primeros estratos del perfil en forma independiente (sectores sobre la línea de siembra y en el entresurco).

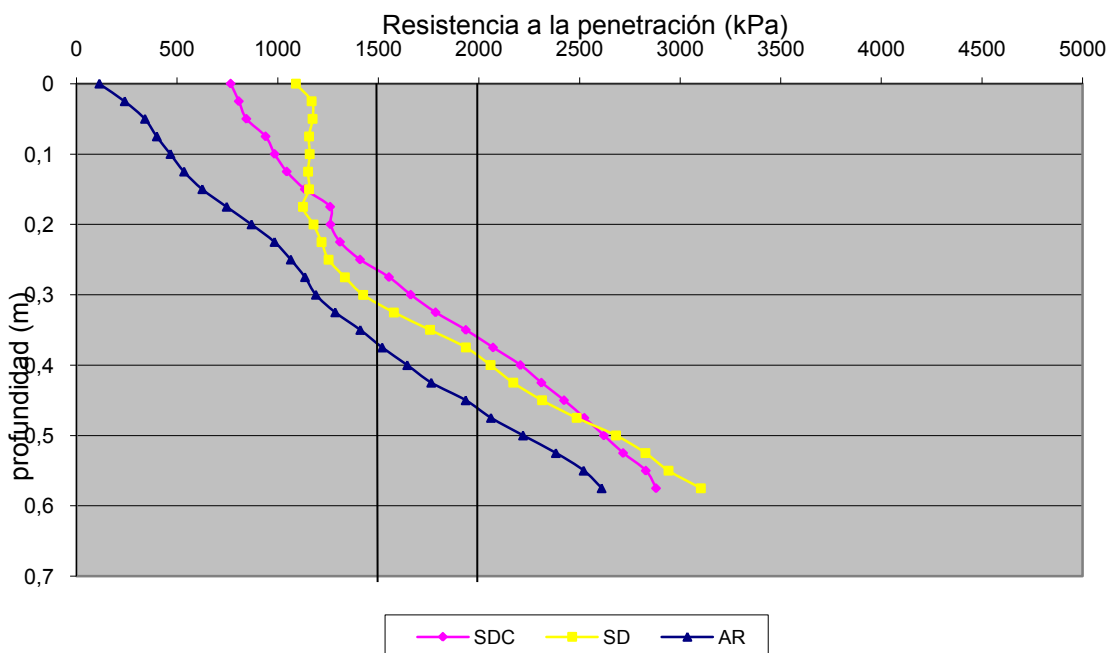


Gráfico 11. Resistencia a la penetración al momento de la siembra en el entresurco.

En el análisis realizado sobre los valores de resistencia a la penetración correspondientes al momento de la siembra en el entresurco (gráfico 11), se observan diferencias significativas entre todos los tratamientos de 0 m a 0,05 m correspondiendo los mayores valores a SD y los menores a reja, mientras que el tratamiento de SD sobre terreno cincelado obtuvo valores intermedios en los estratos considerados.

Para la profundidad de 0,075 m se mantuvieron únicamente las diferencias significativas de ambos tratamientos sin remoción previa con respecto al tratamiento con arado de reja y vertedera. La compactación ocurrió siempre por encima de los 0,2-0,25 m de profundidad. Los resultados resultan también coincidentes con los reportados por Mora Gutiérrez et al. (2001) en lo referente a que en los primeros 0,1m todos los tratamientos de labranza presentaron valores de resistencia a la penetración inferiores a 1 MPa. Sin embargo el tratamiento de siembra directa, no alcanzó en esta instancia el valor de 1,5 MPa informado por dichos autores.

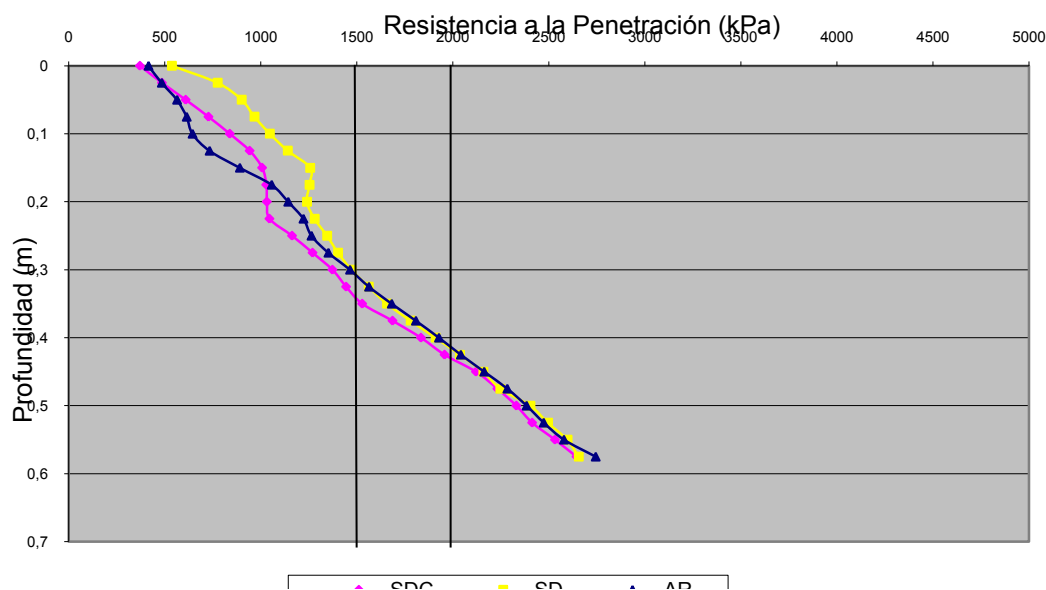


Gráfico 12. Resistencia a la penetración al momento de la siembra sobre la línea de siembra.

En cuanto a los resultados obtenidos al momento de la siembra sobre la línea de acción de la sembradora (gráfico 12), en 0,0 m y 0,025 m no se observan diferencias entre tratamientos lo que podría deberse a la acción de roturación del terreno por parte de la cuchilla turbo en los sistemas sin remoción, que disminuyó drásticamente la RP con respecto a la condición inicial. En los estratos inmediatamente inferiores, correspondientes a 0,05 y 0,075 m, solamente se registraron diferencias significativas entre AR y SD, resultando el tratamiento sin remoción, con cincelado previo, intermedio entre los mismos; esto no condice con lo expuesto por Erbach et al. (1992) quienes afirman que para estas profundidades al momento de la siembra no habría diferencias entre lo trabajado con arado de reja y el resto de los tratamientos. En forma relativa, los mayores efectos de “descompactación”, en la línea de siembra, disminución de la RP del suelo se verificaron para el tratamiento SD. Sin embargo, no alcanzaron como fue anteriormente expuesto para eliminar las diferencias con el tratamiento AR. La condición física del suelo previa a la labor de siembra podría ser la causa de la menor prestación de roturación para este tratamiento por parte de la cuchilla “turbo”.

El estrato del suelo entre los 0,10 y los 0,15 m de profundidad no muestra interacción entre tratamientos y sectores del terreno. El terreno trabajado con AR muestra los menores registros de RP para ambos sectores, correspondiendo los valores más bajos al sector del entresurco. Este tratamiento alcanzó diferencias altamente significativas con los dos tratamientos sin remoción, los cuales no se diferenciaron entre sí. Los mayores valores en estas profundidades correspondieron al terreno bajo SD, con pequeñas diferencias entre los sectores del terreno. Pese a ello, no se alcanzan valores restrictivos al crecimiento radicular, si bien para el tratamiento de siembra directa el valor máximo registrado se encuentra cercano al indicado por Echeverría y Studdert (2001), de 1,3 MPa como limitante para el desarrollo radical del maíz en los primeros estadios de crecimiento.

Tal como reportaron Leiva y Hansen (1984) la siembra directa presentó las mayores diferencias en resistencia en los primeros estratos del terreno con respecto al tratamiento con arado de reja y vertedera. Sin embargo, solamente a los 0,10m de profundidad, para el tratamiento de siembra directa, se alcanzan los valores indicados

por Collis-George y Yoganathan (1985) como posibles de afectar la emergencia del cultivo de trigo. Resulta pertinente en este sentido, lo informado por Finlay *et al.* (1994), quienes demostraron la conveniencia de la roturación del suelo por debajo de la profundidad de siembra, a los efectos de disminuir la densidad aparente y la resistencia a la penetración del suelo para alcanzar un mayor porcentaje de emergencia en el cultivo de trigo.

A partir de los 0,175 m de profundidad y hasta 0,55 m también se apreció interacción entre los tratamientos y los sectores de entresurco o línea de siembra exceptuando la determinación a 0,25 m de profundidad, observándose para la mayoría de las profundidades un menor valor para reja en el entresurco que en la línea de siembra y un mayor valor para los tratamientos sin remoción en el entresurco que en la línea de siembra. En función del proceso de interacción mencionado, se procedió nuevamente al análisis de los efectos de los sistemas de labranza para cada sector del terreno en particular. En cuanto a la profundidad de 0,25 m, los valores mantuvieron la misma tendencia general para tratamientos y sectores, siendo la significancia del 94%, por lo cual el análisis del perfil podría tomarse de manera integral para todas las profundidades evaluadas.

En el sector de entresurco a partir de 0,20 m, SD de primer año presenta los mayores valores hasta 0,45 m donde empieza a superarlo la siembra directa de 10 años hasta 0,575 m. Desde 0,325 m hasta 0,575 m existen diferencias significativas entre reja y SD de primer año y entre reja y SD de 10 años. Esto no puede atribuirse al efecto de la humedad en el tratamiento de reja y vertedera ya que los valores obtenidos para esa fecha (gráfico 5) fueron menores a los de los tratamientos sin remoción, con diferencias altamente significativas; por lo tanto, la menor resistencia a la penetración en este tratamiento se debería a una menor compactación del suelo a nivel subsuperficial. Sin embargo, es importante indicar que las diferencias, si bien estadísticamente alcanzan significancia, no resultan relevantes en estas profundidades, en relación a sus efectos sobre el desarrollo de los cultivos, puesto como consecuencia de las precipitaciones ocurridas -54 mm- (gráfico 3) entre el laboreo y la siembra, ninguno de los tratamientos de labranza tenía restricciones para la implantación del cultivo hasta los 0,20 m de profundidad, al momento de siembra, mientras que tampoco se registraron posibles limitaciones al crecimiento radical hasta prácticamente 0,30m.

En el sector de la línea de siembra desde 0,175 m hasta 0,575 m no existen diferencias significativas entre tratamientos aunque se observan mayores valores para SDC, esto podría deberse, en concordancia con lo dicho por Swan *et al.* (1987), y teniendo en cuenta la forma característica de transmisión de las tensiones en el suelo por las ruedas de los vehículos, a la mayor compactación ejercida por la rueda del tractor y la sembradora sobre la línea de siembra en reja lo que haría desaparecer las diferencias entre los tratamientos con remoción y los tratamientos sin remoción. Los valores restrictivos para el crecimiento radical (1,5 MPa) se alcanzan alrededor de los 0,35 m de profundidad para todos los tratamientos mientras que los valores limitantes para el crecimiento radical se alcanzan a los 0,425 m de profundidad por lo que no estaría afectando el desarrollo normal del cultivo puesto que este se encuentra en las etapas iniciales en las que el sistema radical no alcanza la profundidad mencionada.

Comparando en forma integral, los valores registrados en el entresurco con los registrados sobre la línea de siembra se puede observar un aumento general para todas las profundidades en el tratamiento de reja lo que hace desaparecer las diferencias registradas con los otros tratamientos a partir de los 0,2 m de profundidad aproximadamente. Los mayores valores de RP a nivel superficial, para este tratamiento, puede atribuirse a la compactación ocasionada por el conjunto de los mecanismos rodantes del tren de siembra, ruedas limitadoras de profundidad,

conformadoras de camellón (cierre de surco), como así también las ruedas del tractor y de la propia sembradora.

La determinación de resistencia a la penetración correspondiente a la medición realizada el 5/01/05 (gráfico 13) arrojó diferencias significativas entre tratamientos solamente hasta los 0,175 m de profundidad. Cabe aclarar que el suelo se encontraba en ese momento, tal como se visualiza en el gráfico 6 con un bajo contenido de humedad, el cual podría acercarse al PMP en los primeros 0,30 m del perfil para todos los tratamientos, debido a la sequía temporaria que se estaba atravesando.

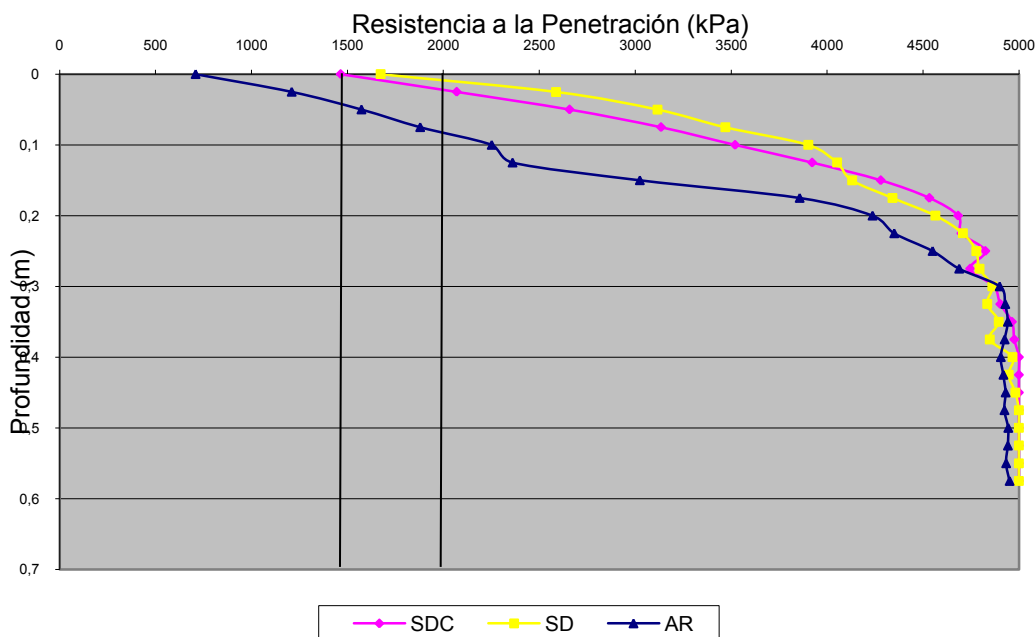


Gráfico 13. Resistencia a la penetración en el inicio de la floración para los distintos tratamientos.

Esta condición invalidó la mayoría de las mediciones realizadas con el penetrómetro a partir de los 0,30 m de profundidad aproximadamente. Por lo expuesto, los valores graficados, por debajo de esta profundidad, son solamente estimativos. Nuevamente, la diferenciación se produjo fundamentalmente entre el tratamiento de arado de reja y vertedera y los tratamientos sin remoción; a nivel de superficie esta diferenciación fue significativa. Las diferencias entre AR y SD fueron altamente significativas desde los 0,025 a los 0,15 m de profundidad, mientras que las diferencias entre AR y SDC fueron altamente significativas desde los 0,075 a los 0,15 m de profundidad y a su vez fueron significativas a los 0,05 y a los 0,175 m de profundidad. Pese a ello, es importante destacar que todos los tratamientos a partir de 0,20 m de profundidad superaron los valores indicados como restrictivos para el crecimiento radical.

Los valores de humedad gravimétrica registrados para los distintos tratamientos de labranza (gráfico 6) no pueden justificar las diferencias en la resistencia a la penetración en los primeros 0,175 m del perfil. Por lo tanto, estos resultados demuestran básicamente la acción residual de la labor primaria con el arado de reja y vertedera – hasta aproximadamente 0,20 m de profundidad- lo que produjo una menor resistencia a la penetración en el suelo bajo dicho tratamiento, pasados 3 meses desde su realización. Este tratamiento al menos muestra hasta los 0,075 m de profundidad valores inferiores a los 2 MPa considerados limitantes para el

crecimiento radical. En cambio el promedio de los tratamientos sin remoción supera ese valor a partir de los 0,025 m de profundidad y en muchas mediciones lo hacían desde la superficie.

En virtud de lo expuesto, es de esperar que existiera en las condiciones dadas, una afectación del cultivo vinculada a las propiedades físicas de los suelos provocados por las labranzas y la cantidad de lluvia, en función de lo dicho por Senigagliesi y Ferrari (1993) y Griffith et al. (1986). Si se analiza el lapso desde la siembra hasta floración, se alcanzan en ambos períodos condiciones extremas de baja humedad. En ambas situaciones, existieron diferencias significativas entre tratamientos, correspondiendo los menores valores siempre al tratamiento AR. Indudablemente, la condición mecánica del suelo ofreció mejores condiciones para el desarrollo del sistema radical para este tratamiento. En el período entre ambas mediciones, es de esperar que dichas diferencias al menos se hayan mantenido; sin embargo, si se tiene en cuenta que en ambas condiciones de humedad, las diferencias en resistencia a la penetración tienden a minimizarse (en mayor medida con altos tenores de humedad), podría pensarse que las mismas hayan sido mayores a valores intermedios de humedad, condicionando el desarrollo radical y el movimiento del agua en acuerdo con lo dicho por Rivas (1998).

En la figura 13 se observa el gráfico representativo de resistencia a la penetración según la profundidad correspondiente al 10/05/05, coincidente con el período de cosecha.

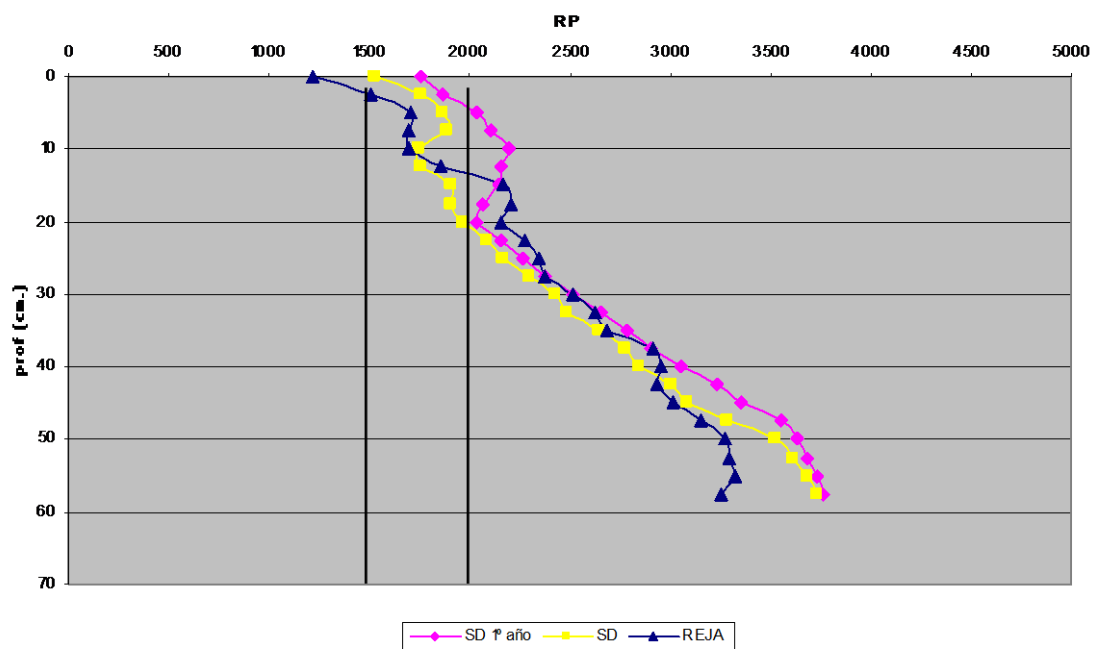


Gráfico 14. Resistencia a la penetración al momento de cosecha para los distintos tratamientos.

Se registraron diferencias significativas entre los tratamientos de AR y SD de un año sobre cincel para 0 m debido a la remoción producida por la reja. En 0,10 m y 0,125 m se observan diferencias significativas entre arado de reja y SD de un año y entre SD y SD de un año. Si bien puede resultar claro que los efectos de la labranza con arado de reja se mantienen al final del ciclo, no resulta igual con lo que ocurre entre ambos tratamientos sin remoción. En parte puede deberse a un sellado superficial en cincel por ser el primer año sin remoción (con menor cantidad de residuos de cosecha en superficie) que podría explicar las pequeñas diferencias en el

contenido de humedad del suelo en dicho rango de profundidad, a partir de una menor infiltración. No obstante, las diferencias parecieran demasiado exiguas para justificar las diferencias en resistencia a la penetración. A partir de dicha profundidad y hasta los 0,575 m no se observan diferencias significativas entre tratamientos lo cual concuerda con lo encontrado por Mora Gutiérrez et al. (2001) quienes no encuentran diferencias significativas después de los 0,10 m de profundidad. En 0,575 m se observan diferencias significativas entre SD sobre cincel y AR lo que podría deberse a características particulares del suelo a esa profundidad (tosca). También se diferenció entre las muestras tomadas sobre la huella dejada por la cosechadora y las que fueron tomadas sobre sectores no pisados por la maquinaria, encontrándose diferencias significativas entre las zonas pisadas y las no pisadas desde 0 m hasta 0,15 m y desde 0,375 m hasta 0,55 m lo que pone en evidencia que esta perturbación tiene efecto hasta las mayores profundidades de medición. La interacción entre tratamientos y zonas bajo la huella y fuera de la huella no fue significativa para ninguna profundidad lo que demostraría que todos los tratamientos fueron alterados de la misma forma. Esto indica además que una parte importante del perfil fue afectado por el tránsito de cosecha en los tres tratamientos de labranza. Sin embargo, a partir de lo visualizado en los gráficos respectivos (14 a 18) es posible diferenciar algunos efectos no detectados a partir del análisis estadístico. Por un lado en el tratamiento correspondiente a la labranza con arado los incrementos de resistencia a la penetración por el tránsito resultan notorios hasta los 0,20 m de profundidad. Para el tratamiento de SD sobre suelo con historia de escarificación la incidencia del tránsito en los estratos superiores es visible hasta los 0,3 m, mientras que en el suelo bajo siembra directa el mismo se limita a los primeros 0,1 m.

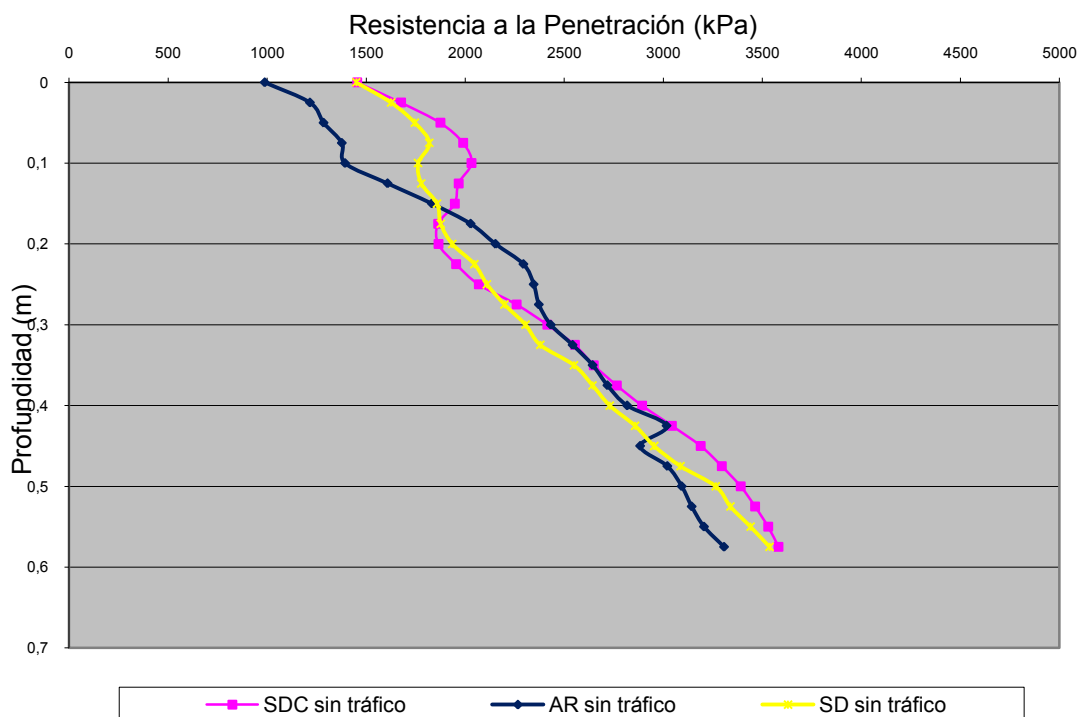


Gráfico 15. Resistencia a la penetración al momento de cosecha para los distintos tratamientos en la zona sin tráfico.

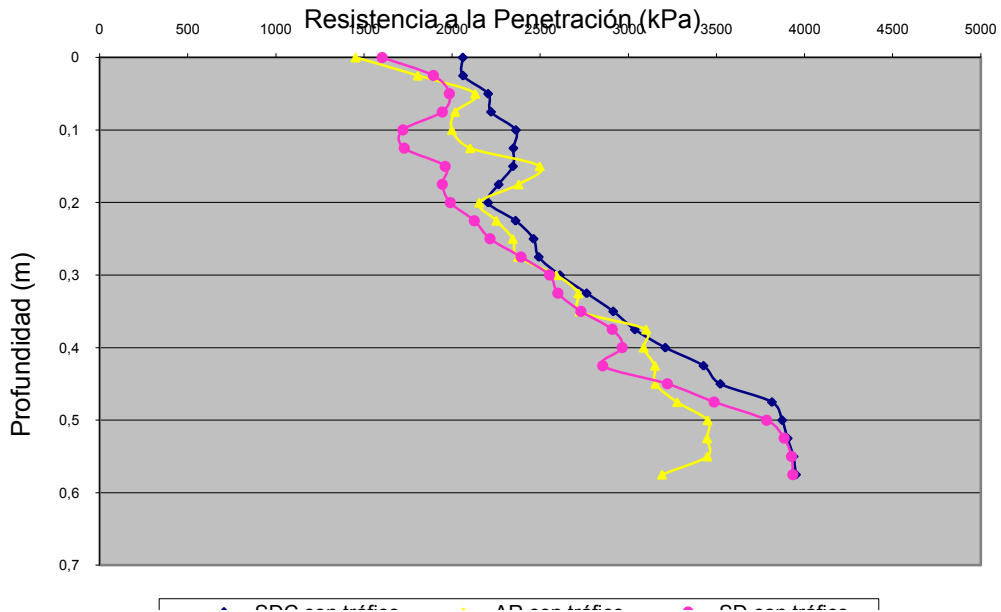


Gráfico 16. Resistencia a la penetración al momento de cosecha para los distintos tratamientos en la zona con tráfico.

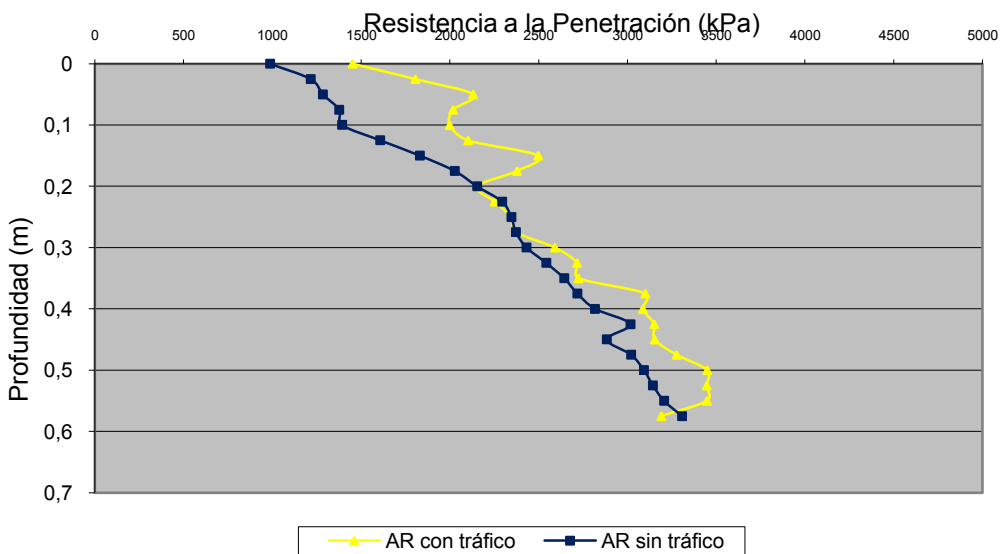


Gráfico 17. Resistencia a la penetración al momento de cosecha para el tratamiento de arado de reja y vertedera en las zonas con y sin tráfico.

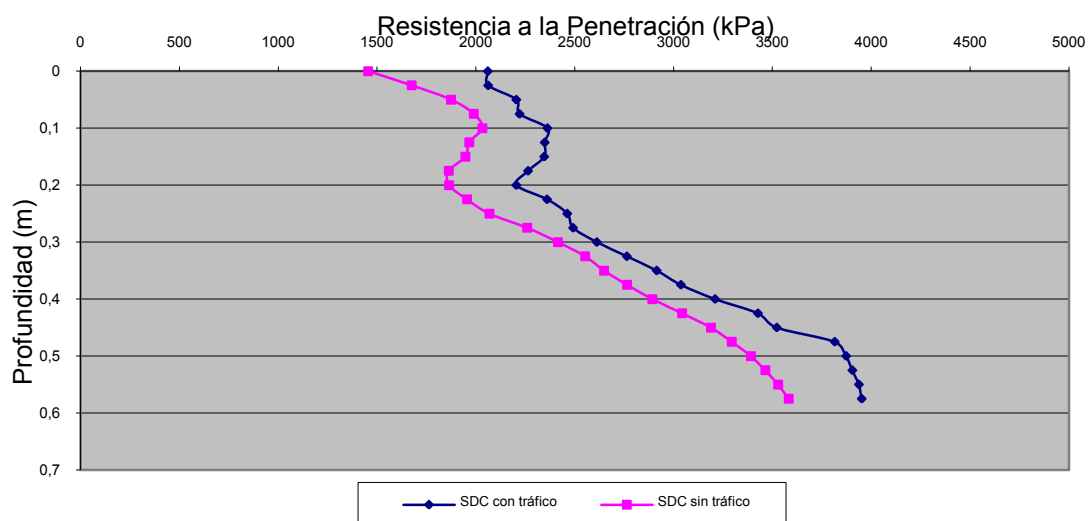


Gráfico 18. Resistencia a la penetración al momento de cosecha para el tratamiento de SD sobre terreno previamente cincelado en las zonas con y sin tráfico.

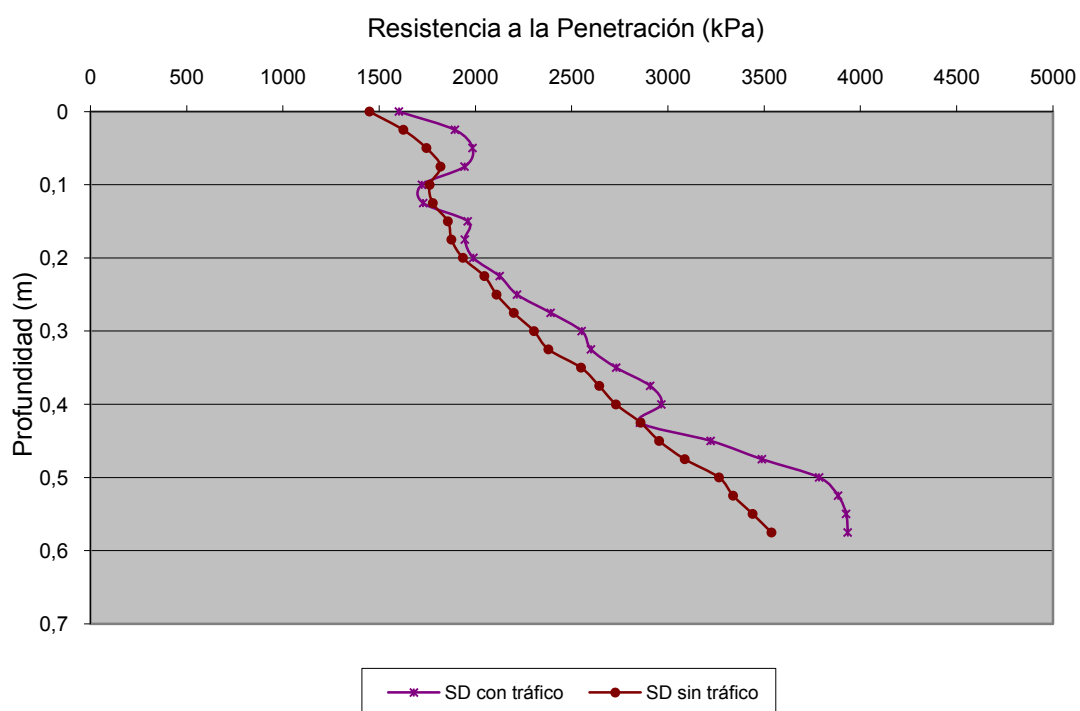


Gráfico 19. Resistencia a la penetración al momento de cosecha para el tratamiento de SD en las zonas con y sin tráfico.

En profundidad, en cambio, los efectos del tránsito sobre este parámetro, muestran un comportamiento similar, concentrándose los efectos entre los 0,4 y 0,6 m

En el gráfico 20 se observan los datos correspondientes a la penetrometría realizada el 19/8/05

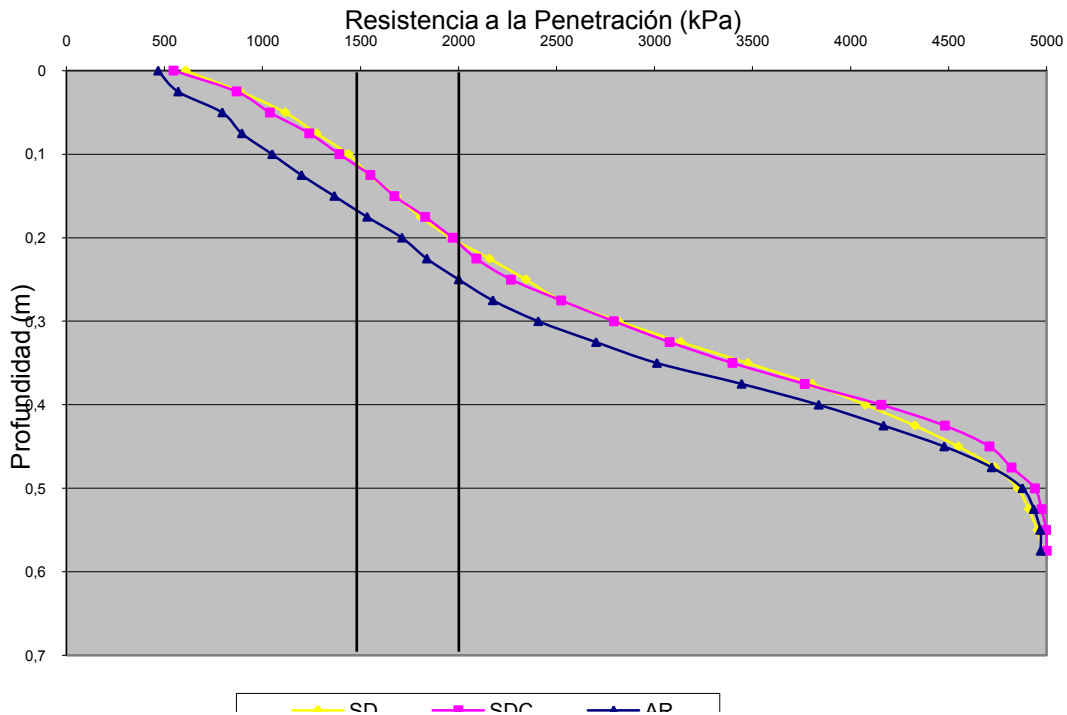


Gráfico 20. Resistencia a la penetración en el mes de agosto para los distintos tratamientos

Existieron diferencias significativas entre SD y AR de 0 m a 0,15 m atribuyéndose a la acción del arado, apareciendo una zona de los 0,175 m a los 0,20 m sin diferencias que se podría atribuir a la mayor resistencia a la penetración dentro de este tratamiento en la zona de transición entre el perfil trabajado y no trabajado a lo largo de los años por el arado de reja, sin que ello implique la formación de un “piso de arado”. Luego entre los 0,225 m y los 0,375 m vuelven a observarse diferencias significativas entre estos dos tratamientos. Estas diferencias resultan difíciles de explicar en virtud a que en dichas profundidades la humedad del suelo en el tratamiento AR resultó menor a la de los tratamientos sin remoción (gráfico 8). Tampoco resulta lógico que existan mayores diferencias entre los tratamientos AR y SD, puesto que no es un sector del perfil del suelo, que sea interesado por las labranzas.

En cuanto a la comparación entre AR y SDC se observan diferencias significativas a los 0,025 m y entre los 0,075 m y los 0,175 m zona donde actuó el arado. Luego al igual que en siembra directa existe una zona sin diferencias, atribuido al mismo factor que en la comparación con SD, hasta la franja que va de los 0,275 m a 0,35 m y de 0,40 m a 0,425 m donde vuelven a observarse diferencias. La ausencia de diferencias entre aproximadamente 0,20 y 0,30 m de profundidad, indicaría que pasados 2 años de la última labor de cincelado, los efectos del trabajo del escarificador prácticamente han desaparecido. Más aún, los valores en dicho estrato indican mayor resistencia a la penetración para el terreno previamente cincelado que el sector del perfil que nunca habría sido trabajado en el tratamiento de arado de reja y vertedera. Esto implicaría que podría haberse llegado a una condición física del terreno peor que la inicial, lo cual podría atribuirse a procesos de compactación sobre suelo removido.

En un análisis general de la resistencia a la penetración para los distintos sistemas de labranza, los resultados resultan coincidentes al menos en parte con los

reportados por Nesmith et al. (1987), Mahboubi et al., (1993) y Chagas et al. (1994), en cuanto a que los sistemas de siembra directa pueden presentar mayor resistencia a la penetración y compactación que los sistemas con laboreo convencional del suelo, ya que esta tendencia se manifiesta a lo largo de todo el período de medición, en las zonas no transitadas. Sin embargo, no puede afirmarse que la Siembra directa incremente la humedad disponible en la capa arable. En forma consistente, fue detectado un mayor porcentaje de humedad solamente en profundidad, para el estrato de 0,40 a 0,60 m durante todo el período de medición. Vinculado a este aspecto, podría atribuirse a la mayor compactación, las dificultades para la provisión de agua al cultivo en el período próximo a la floración, en acuerdo con lo indicado por Oussible et al. (1992), como así también el menor desarrollo de las plantas según lo que era posible visualizar en dicho estado, coincidente con lo afirmado por Cornish y Lymbery, (1987) y Schmidt y Belford, (1994).

La comparación entre zonas transitadas y no transitadas mostró diferencias significativas para todas las profundidades de los 0 m hasta los 0,55 m existiendo interacción con los tratamientos solamente para los 0 m de profundidad donde el tráfico afectó mayormente a SD ya que allí generaría una compactación superficial que no puede ser contrarrestada con la remoción del suelo existente en los años anteriores para los otros dos tratamientos

En los gráficos 21 a 23 pueden observarse los efectos del tránsito de cosecha para los distintos tratamientos; si bien todos los tratamientos fueron afectados por este factor en forma similar, no todos fueron afectados en igual magnitud en los distintos estratos.

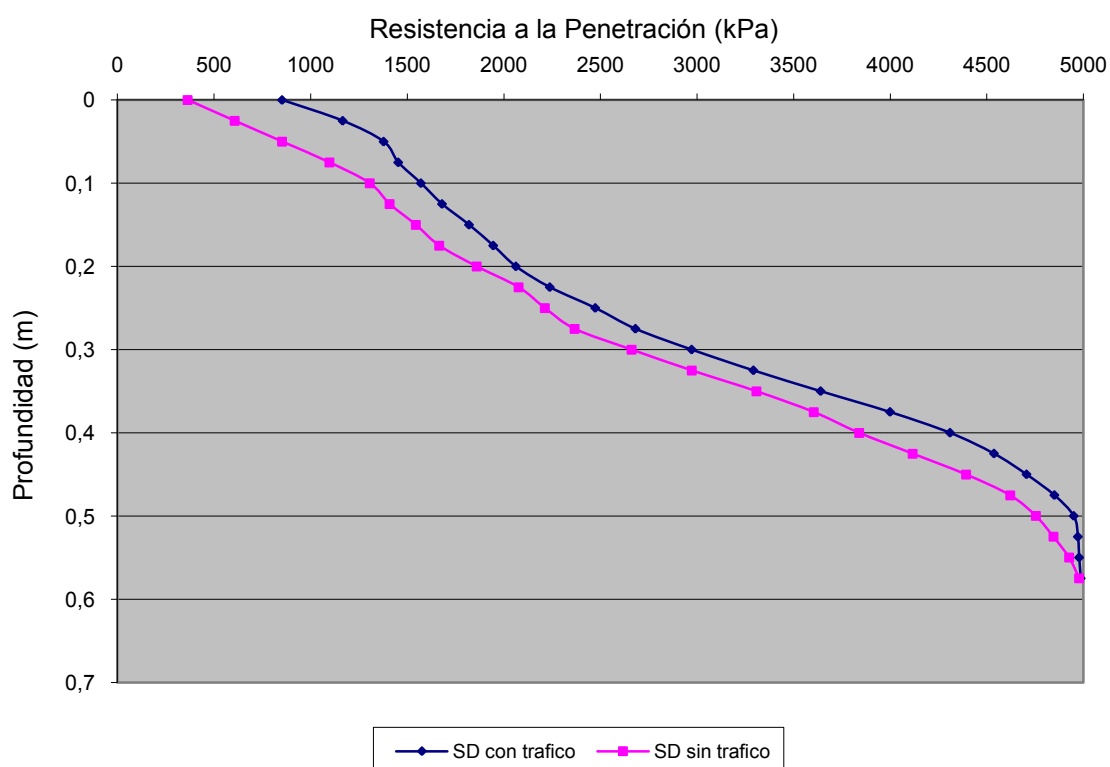


Gráfico 21. Resistencia a la penetración en el mes de agosto para el tratamiento de SD en los sectores con y sin tráfico.

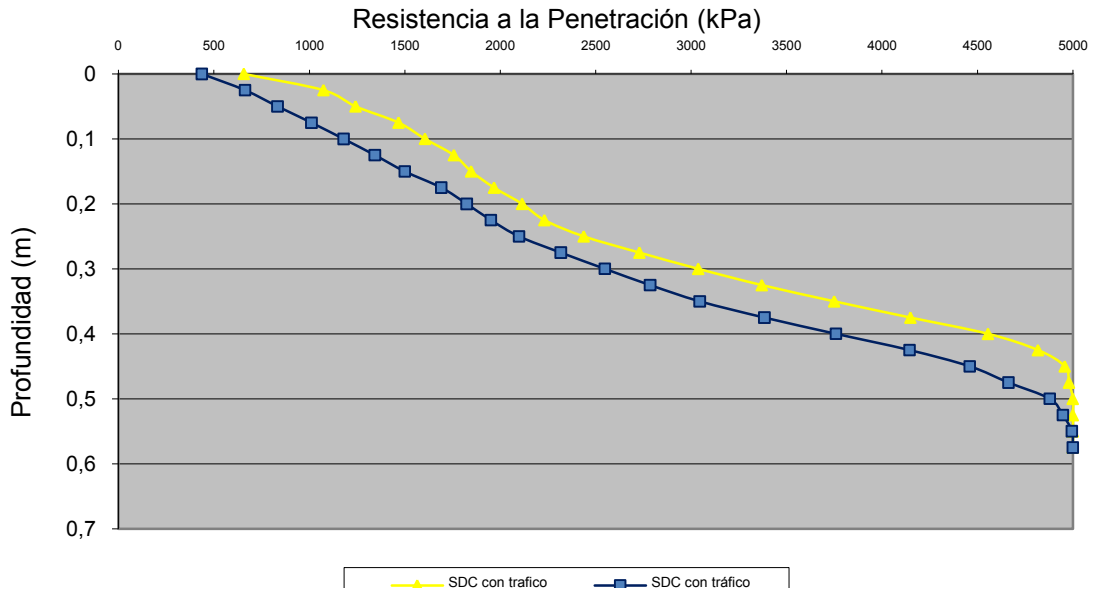


Gráfico 22. Resistencia a la penetración en el mes de agosto para el tratamiento de SD sobre terreno previamente cincelado en los sectores con y sin tráfico.

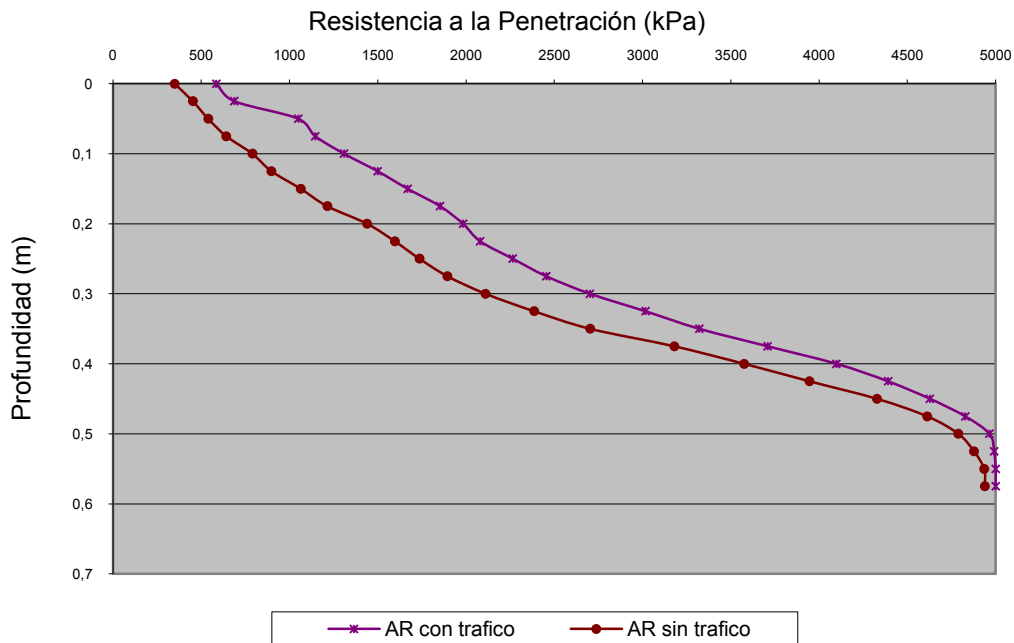


Gráfico 23. Resistencia a la penetración en el mes de agosto para el tratamiento de arado de reja y vertedera en los sectores con y sin tráfico.

El tratamiento AR evidencia una menor compactación a nivel superficial en la zona no transitada lo que estaría influenciado por el efecto residual de la labranza del año anterior; esta situación ocasiona una mayor diferenciación en este tratamiento entre los sectores con y sin tráfico hasta aproximadamente los 0,30 m de profundidad lo cual se ve reflejado en el gráfico 17. Si bien la zona bajo tránsito alcanzó en este tratamiento valores inferiores a los de los tratamientos sin remoción para los primeros 0,30 m del perfil en general, las diferencias con los tratamientos sin remoción no son

significativas y son menos evidentes que en la zona bajo tránsito. En los estratos inferiores del perfil las diferencias entre tratamientos resultan poco importantes.

Los efectos del tránsito generaron un aumento de alrededor del 50 % en la resistencia a la penetración en los tratamientos sin remoción en los primeros 0,10 m del perfil mientras que en el tratamiento con arado de reja y vertedera el aumento fue de alrededor del 100%. En la zona que abarca desde los 0,20 a 0,30 m de profundidad aproximadamente el aumento fue de alrededor del 15% para los tratamientos sin remoción y del 30% para el tratamiento de arado de reja y vertedera, por último a partir de los 0,40 m de profundidad el aumento fue de alrededor del 10% para todos los tratamientos. Esto estaría indicando que la menor resistencia a la penetración evidenciada en el tratamiento con remoción del suelo debida a la acción de la labranza con arado de reja y vertedera ve desaparecer las diferencias existentes respecto a los tratamientos sin remoción en la zona bajo tránsito, ya que la compactación que allí ocurre genera valores que se acercan a los hallados en los tratamientos sin remoción en la misma zona del terreno. Lo expuesto, resulta coincidente con lo determinado por Soane et al. (1982) quienes afirmaron también que los suelos bajo siembra directa adquieren con el transcurso de algunos años, un estado de precompactación que les permite soportar mejor los efectos del tránsito.

Si se tienen en cuenta los registros de humedad para esta instancia de medición, entre el 25 y el 30% en promedio para todos los tratamientos a las distintas profundidades, puede afirmarse que los efectos del tránsito de cosecha resultan de importancia en el estado mecánico del suelo y afectaron prácticamente a la totalidad del perfil bajo estudio, puesto que los mismos se incrementarán a menores tenores de humedad. La magnitud de estos efectos podría explicarse en parte por la humedad al momento de cosecha, que rondó el 20 y el 25% en promedio para todo el perfil, intensificando los procesos de compactación, superficial y subsuperficial. A esto se suma que las cargas sobre el eje de la máquina cosechadora, superan habitualmente 6 Mg, límite indicado por Håkansson y Danfors (1981) para evitar problemas de compactación subsuperficial, como así también el valor de 32 kN en el eje recomendado por Van den Akker (1998) para mantener la inducción de compactaciones por tráficos dentro del horizonte arable (Ap), en la medida que se utilicen neumáticos de mayor ancho y menores presiones de inflado.

Estos resultados indican que no parecen adecuadas las afirmaciones de Demmi y Puriccelli (1987) y Miaczynski y Tschapek (1965), entre otros, en relación con que son los suelos con estructura degradada, sometidos a las presiones del tránsito y de las herramientas de labranza los que serían susceptibles de sufrir compactación. El tránsito constituye por sí solo un agente de degradación física del suelo, independientemente de las máquinas de labranza utilizadas y del estado de degradación del suelo. Además, los resultados resultan en parte coincidentes con lo afirmado por Flowers y Lal (1998) quienes no encontraron mayores diferencias en la distribución vertical de la resistencia a la penetración para distintos sistemas de labranza. Por otra parte difieren de lo reportado por Ismail et al. (1995) quienes no encontraron efectos significativos de diferentes sistemas de labranza en la compactación de los suelos y concuerdan en forma particular con lo encontrado por Domínguez et al. (2000) en lo relacionado con una mayor acumulación de compactación superficial y una mayor capacidad portante en suelos bajo siembra directa. También los resultados resultan concordantes con lo expuesto por Álvarez et al. (2006) quienes determinaron valores de resistencia a la penetración de la capa superficial significativamente mayores bajo SD que en Labranza convencional. A su vez, afirman los resultados de la revisión efectuada por Álvarez y Steimbach (2009) que encontraron diferencias significativas para los estratos correspondientes a los primeros 0,10 m, mientras que a mayores profundidades todos los tratamientos tuvieron similares valores. En este mismo sentido se afirma lo expuesto por Tebrugge

y During (1999); López-Fando et al. (2007), Franzluebbbers y Stuedemann (2008). Sin embargo, no ocurre lo mismo en relación a la labranza reducida, (SDC) en contrario a lo expresado por Vetsch y Randall, (2002), Siri-Prieto et al. (2007) y Vetsch et al. (2007)

Pese a lo expuesto en los párrafos precedentes, esa mayor resistencia a la penetración de los estratos superficiales y, por lo tanto, mayor capacidad portantes, no fue capaz de limitar los efectos de la compactación inducida por tránsito a nivel subsuperficial. Por ello, las condiciones de trabajo habituales, a nivel de producción, resultan preocupantes en relación con la posibilidad de reducir los riesgos de inducción de compactación y degradación física del suelo. Por un lado, la época de cosecha del cultivo de maíz resulta coincidente con el período otoñal, generándose condiciones de elevada humedad en esta región, por lo que tal como afirmara Alakukku (1997), el tráfico debiera reducirse al mínimo indispensable y los vehículos debieran portar ruedas que les permitieran limitar su presión de inflado a una máxima de 50 kPa. Sin embargo, estos factores son de difícil control por parte del productor, puesto que generalmente contrata la cosecha, en condiciones de mucha demanda y escasa oferta de máquinas, las cuales mayoritariamente no califican según los requerimientos especificados anteriormente. Además, de lograrse ello, junto a lo indicado por Smith y Dickson (1990) (reducción del peso total de los conjuntos tractor – apero) habría que utilizar equipos más pequeños y, por lo tanto, aumentar el número de pasadas sobre cada hectárea de terreno a trabajar, pudiéndose generar, según Jorajuría y Draghi (2000) y Botta *et al.* (2002) compactación subsuperficial – y superficial - con el pasaje repetido, de tractores de baja carga/eje.

En forma general, también, estos resultados respaldan lo aseverado por Carter (1990) en cuanto a que los sistemas que no remueven el suelo pueden ayudar a la compactación del mismo.

Densidad aparente:

La densidad aparente seca (gráfico nº 24), al momento de la siembra del cultivo, no mostró diferencias significativas entre tratamientos para la medición realizada desde superficie por medio de la sonda Troxler (0 m de profundidad), pero si mostró diferencias altamente significativas entre reja y los tratamientos sin remoción para el resto de las profundidades explicándose dichas diferencias por la acción del arado de reja y vertedera. Ninguno de las tratamientos superó los valores de densidad aparente determinados por Veihmeyer y Hendrickson (1948), de $1,46 \text{ Mg.m}^{-3}$, como umbral crítico para el desarrollo radical de gramíneas, ni el de $1,65 \text{ Mg.m}^{-3}$ establecido por Daddow y Warrington (1984) como umbral de crecimiento radical.

Por debajo de los 0,10m, los tratamientos sin remoción presentaron valores ligeramente superiores a los reportados por Hadas y Stibbe (1977), de $1,2 \text{ Mg.m}^{-3}$ como límites para que el proceso de germinación fuese más rápido y completo, pero en función de la instancia de medición, no se generan impedimentos para el desarrollo del cultivo. Por su parte el tratamiento AR no presenta valores limitantes según este autor para ninguna profundidad de medición. Estas diferencias entre los tratamientos con y sin remoción del suelo pueden explicarse fácilmente para los estratos analizados, puesto que los mismos se encuentran en la zona habitualmente trabajada con el arado de reja y vertedera.

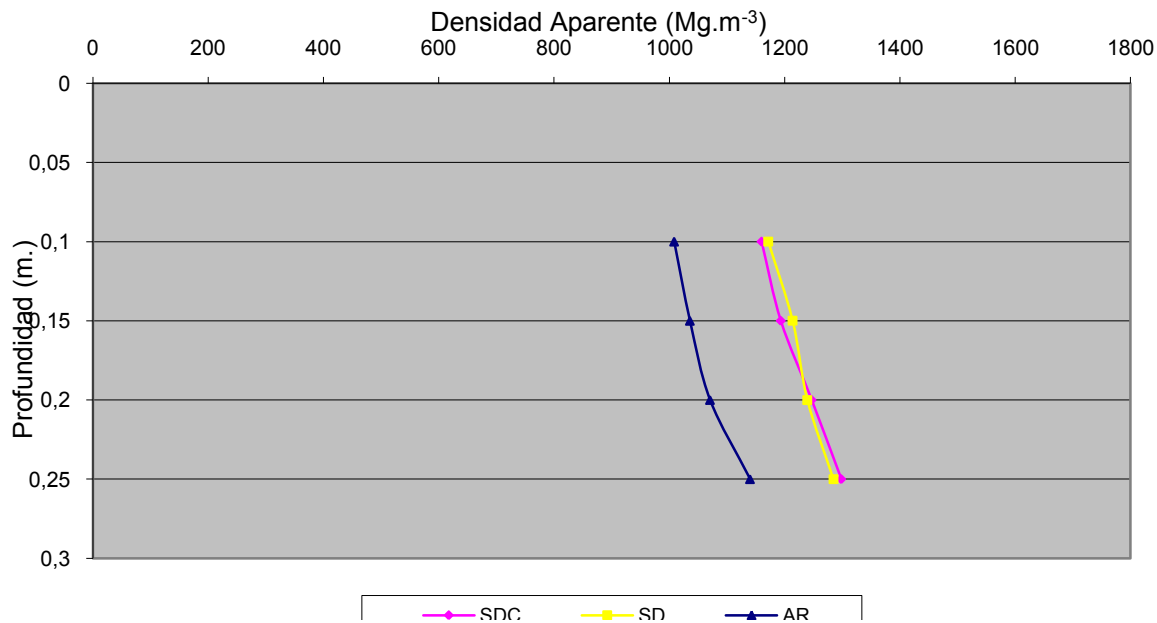


Gráfico 24. Densidad aparente a la fecha de siembra.

Sin embargo, llama la atención que no existan prácticamente diferencias entre los tratamientos de SD y SD sobre suelo cincelado años anteriores. Claramente, el suelo cincelado muestra, un año después de la última labranza, un proceso de consolidación o recompactación, que no permite visualizar efectos residuales del trabajo de escarificación efectuado durante 9 años. Pese a que los valores no resultan restrictivos, el suelo bajo labranza con arado de reja presentaría mejores condiciones físicas para el desarrollo en los primeros estadios de crecimiento

En el gráfico 25 se observan los valores de densidad aparente obtenidos el 5/01/05. No existieron en este momento diferencias significativas entre tratamientos para los 0,10 m de profundidad.

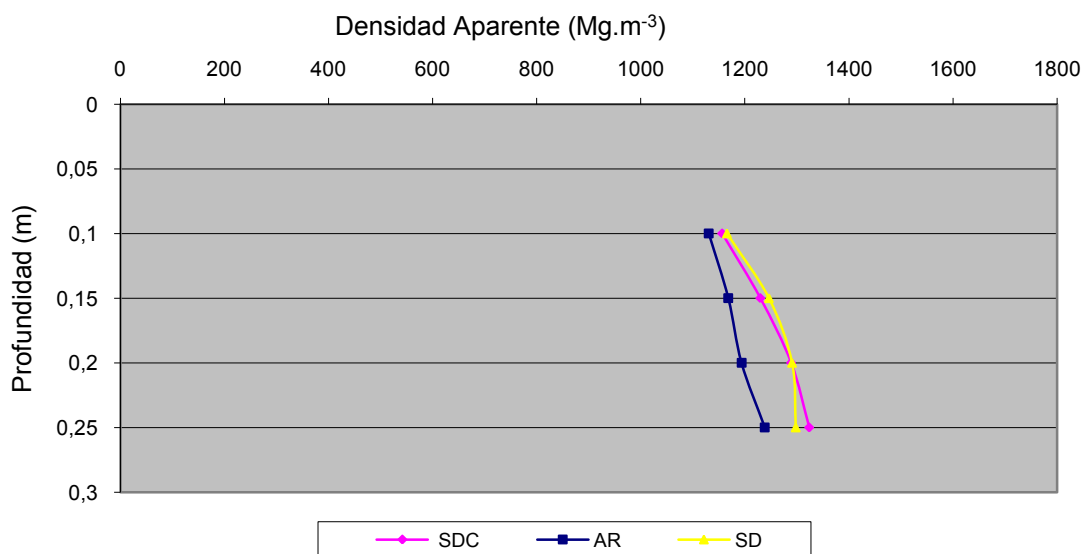


Gráfico 25. Densidad aparente en inicio de floración.

A partir de dicha profundidad y hasta 0,25 m, el tratamiento AR tuvo valores significativamente menores a los de los tratamientos sin remoción, resultando las diferencias altamente significativas con el de SD para los 0,15 m de profundidad. Si se comparan estos valores con los determinados en el mes de octubre, se visualiza que las diferencias entre los tratamientos con y sin remoción del suelo disminuyeron, como resultado de un incremento de la densidad aparente del tratamiento de arado de reja y vertedera. Puesto que las determinaciones se realizaron sobre terreno no transitado en forma posterior a la siembra, las variaciones en la densidad aparente deben atribuirse básicamente a los procesos de consolidación natural del suelo, producto de las precipitaciones acontecidas y del tráfico del propio conjunto tractor-sembradora. No obstante lo expuesto, ninguno de los tratamientos alcanzó niveles críticos para el desarrollo radical, en lo referente a densidad aparente del suelo. Por lo tanto, en el período transcurrido entre la siembra y la floración del cultivo, el estado físico del suelo en los tratamientos sin remoción fue más adverso que en el AR, para el sistema radical, sin que por sí sola la densidad aparente pudiese limitarlo.

En el gráfico 26 se muestran los valores de densidad aparente relevados al momento de la cosecha del cultivo por el método del cilindro.

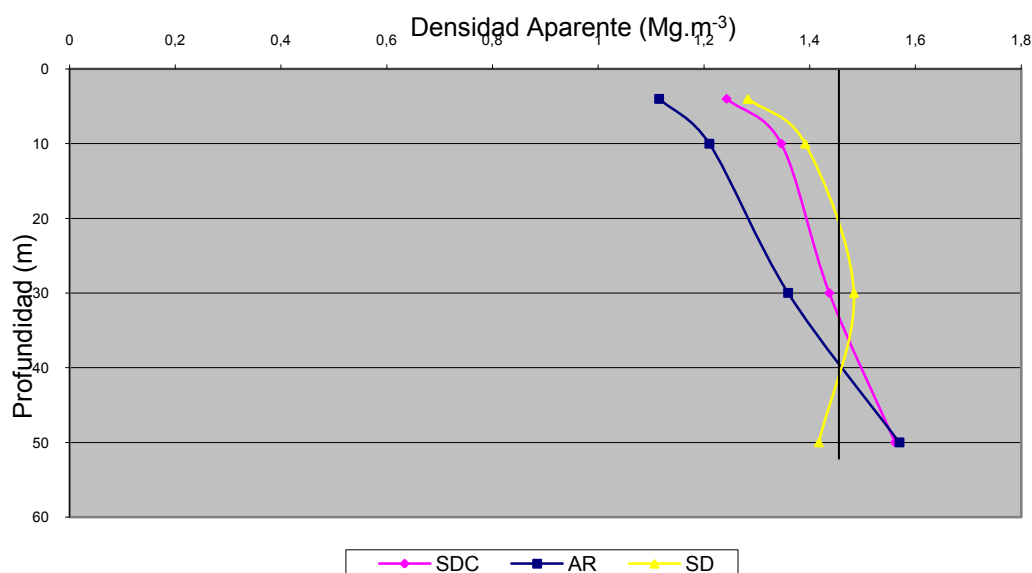


Gráfico 26. Densidad aparente a cosecha.

Se encontraron diferencias significativas entre el tratamiento con arado de reja y vertedera y el tratamiento de siembra directa para los 0,08 m de profundidad evidenciándose en esa zona aún la acción residual del arado. Sin embargo, la mayor diferencia entre tratamientos se observó a los 0,20 m de profundidad donde las mismas fueron altamente significativas entre AR y los tratamientos sin remoción. Las diferencias entre tratamientos se diluyen a los 0,40 m de profundidad, pero una particularidad que se observa es que a los 0,60 m de profundidad vuelven a aparecer diferencias significativas entre tratamientos apareciendo el tratamiento de SD como el de menor densidad y cambiando el de reja y vertedera al de mayor densidad. En acuerdo con la forma de las curvas de densidad aparente, la misma crece para el sistema con arado de reja y vertedera como así también para el terreno que fue cincelado por 9 años hasta la máxima profundidad evaluada. El suelo bajo siembra directa parece encontrar la mayor densidad aparente en el estrato correspondiente a 0,4 m, lo cual sería responsable de la menor densidad aparente a mayores profundidades.

En comparación con la medición realizada en enero puede visualizarse que los valores hasta los 0,25 m de profundidad sufrieron un leve aumento para los tratamientos sin remoción, en tanto que el tratamiento con arado de reja y vertedera muestra valores similares a los de dicha fecha. Los registros de densidad aparente para los sistemas sin remoción, superan el valor de $1,46 \text{ Mg.m}^{-3}$ informado por Veihmeyer y Hendrickson (1948) como el umbral crítico para el desarrollo radical de gramíneas, en el estrato de 0,2 a 0,4 m para SD y alrededor de los 0,4 m para el tratamiento de SD de primer año. En tanto, para reja y vertedera dicho valor es superado entre los 0,4 a 0,5 m de profundidad. En ningún caso se alcanzó el nivel de $1,65 \text{ Mg.m}^{-3}$ establecido por Daddow y Warrington (1984) como umbral de crecimiento radical. La ocurrencia de estos valores en profundidades cercanas a la superficie podría limitar la exploración radical de los cultivos a implantar en el próximo ciclo.

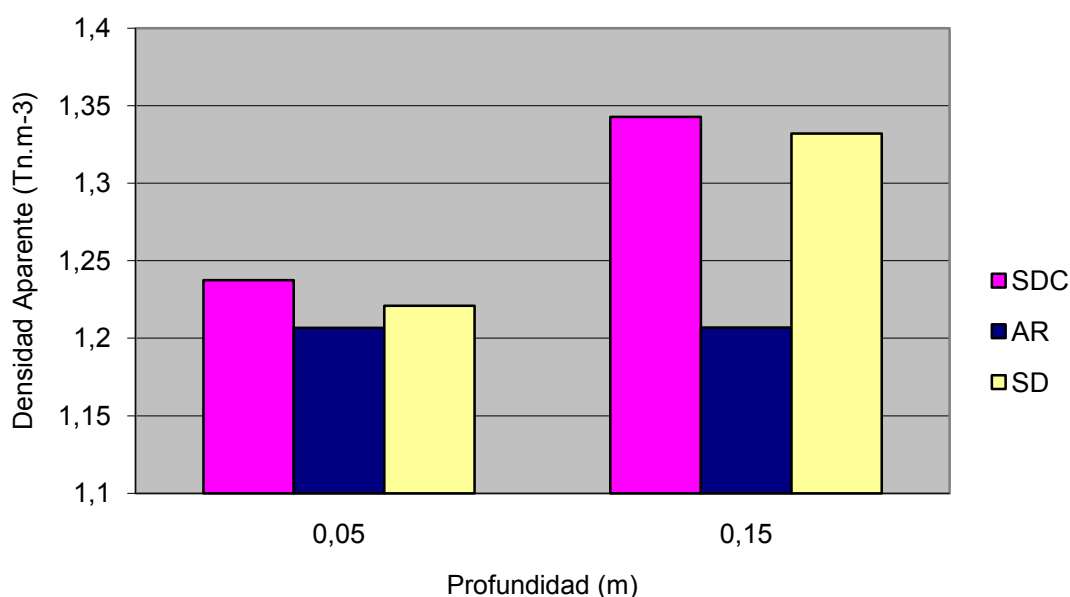


Gráfico 27. Densidad aparente en agosto.

La densidad aparente medida durante el mes de agosto, se puede ver en el Gráfico 27. Para esta fecha únicamente se analizaron los estratos de 0 a 0,10 y 0,10 a 0,20 m de profundidad, en coincidencia con las determinaciones de infiltración, en zonas no transitadas durante la última cosecha. Se hallaron diferencias altamente significativas entre el tratamiento con arado de reja y vertedera y los tratamientos sin remoción para los 0,10 a 0,20 m de profundidad donde se observa un efecto de compactación para estos tratamientos.

En la zona superficial (0 a 0,10 m de profundidad) no se hallaron diferencias entre tratamientos pero es notorio el menor valor del tratamiento con arado de reja y vertedera. En este tratamiento, prácticamente no se encontraron diferencias entre los dos estratos de medición. Esto implicaría, que no se visualizan en primera instancia efectos de compactación importantes producto del laboreo secundario con rastras de discos y que el perfil del suelo trabajado con el arado de reja y vertedera y rastras de discos solamente habría tenido un proceso de consolidación, atribuible según Hernández et al. (2000) a un menor porcentaje de macroagregados estables y en consecuencia una mayor tendencia a la autocompactación superficial y a procesos de compactación por tránsito relativamente uniforme en el mismo.

Por lo contrario, en los tratamientos sin remoción del suelo, existen diferencias importantes entre la densidad aparente de los primeros 0,10 m del perfil, con respecto a lo que ocurre entre 0,10 y 0,20 m de profundidad, en los cuales se alcanzan registros cercanos a $1,34 \text{ Tn.m}^{-3}$. Los valores para estos estratos, muestran una tendencia similar a la determinada aproximadamente 10 meses antes, al inicio del ciclo, pero con valores algo mayores, lo cual implicaría un empeoramiento de la condición física del suelo.

Los resultados de la densidad aparente muestran en un análisis general diferencias con lo concluido por Voorhees y Lindstrom (1984). Este parámetro, a lo largo de todo el ciclo del cultivo, para la mayoría de los estratos de medición, alcanzó valores significativamente mayores en los tratamientos sin remoción del suelo. Debe tenerse en cuenta que el período de medición se corresponde con más de 9 años de implantados los sistemas de labranza más contrastantes, por lo que de alcanzarse un equilibrio en los mismos, no será en un período de 5 años como lo indicaron dichos autores. Asimismo difieren de lo informado por Taboada et al. (1998), quienes concluyen que la siembra directa no afecta la densidad aparente, la compactación relativa (medida de la calidad de la compactación de un suelo dada por la relación, entre (a) el peso unitario seco del suelo compactado y (b) el peso unitario seco máximo resultante del ensayo de compactación en el laboratorio. Normas ASTM D698 y D1557) ni la distribución de poros, pero sí presenta un aumento significativo de resistencia a la penetración en superficie, el cual no puede ser atribuido a compactación superficial sino a un endurecimiento (reacomodamiento y cementación de partículas) en ambos tipos de suelo. Los resultados del ensayo contradicen también lo encontrado por Tuda et al. (2006) puesto que al final de 10 años de ensayos, se mantienen las diferencias en la densidad aparente entre el sistema de SD y el de AR para los estratos superficiales, como también difieren con lo encontrado por Álvarez et al. (2006a) sobre suelos Argiudoles típicos.

En el presente ensayo, tanto la resistencia a la penetración como la densidad aparente fueron modificadas por los sistemas con y sin remoción del suelo, por lo cual puede afirmarse que existe un estado de mayor compactación en el tratamiento de siembra directa, en relación con el de labranza convencional, que pueden generar restricciones mecánicas a los cultivos. Las mismas podrían ser las causantes de las diferencias en rendimiento del cultivo de maíz (datos no presentados), que alcanzan significancia a un nivel de $p \leq 0,1$ del test de Tukey o al 95% del test de LSD entre el tratamiento de AR y el de SD. Teniendo en cuenta estos resultados, podría inferirse que existiría una menor porosidad en los tratamientos de SD, en forma coincidente con lo medido por Ferreras et al. (1996), siendo posible además que se afecte no sólo el volumen sino también la continuidad de la porosidad (Gómez et al., 1999), lo cual puede en parte correlacionarse con los valores calculados de compactación relativa estimados en función de la compactación Proctor para el tratamiento de SD, que producirían un menor crecimiento y rendimiento del cultivo (Carter, 1990; Lipiec et al., 1991). También resultan coincidentes con lo indicado por Tebrugge y During (1999) y Mc Vay et al. (2006) en cuanto al aumento de densidad aparente en los sistemas de Siembra directa en relación con los labrados en forma convencional, como también con lo mencionado por Strudley et al. (2008) en cuanto a las inconsistencias de los efectos de las labranzas sobre este factor, ya que el mismo presenta variaciones en el tiempo, que dificultan su análisis.

Los resultados encontrados afirman, en parte, lo expresado por Álvarez y Steinbach (2009) en cuanto a que la densidad aparente en el sistema de siembra directa aumenta, con respecto a los suelos trabajados con arado, principalmente cuando la densidad inicial era inferior a $1,3 \text{ Tn.m}^{-3}$. Pese a ello, los incrementos en la densidad aparente del ensayo para SD con respecto a AR fueron del 4,9%, 20% y 9,6% para los estratos de 0 a 0,10, de 0,10 a 0,20 y 0,20 a 0,40 m, respectivamente, con respecto a la situación de ambos sistemas de labranza al final del primer año de

ensayos. Estos incrementos, por debajo de la profundidad habitual de trabajo, indicarían que el tránsito de tractores y máquinas agrícolas ha afectado las propiedades físicas del suelo, con mayores efectos en los primeros 0,2 m del perfil pero con incidencia al menos hasta el estrato de 0,20 a 0,40 m.

Por otra parte, no ha sido posible detectar a través de la densidad aparente la formación de una capa densificada o piso de arado, por debajo de la profundidad de labor tal como fuera encontrado por Mazzucco (1979), Negi et al. (1980), Demmi y Puricelli (1987) y Swan et al. (1987), pese a que el predio cuenta con una historia agrícola con labranza con arado de reja y vertedera y discos de más de 50 años. A ello puede haber contribuido también el tipo de suelo, con valores de materia orgánica cercanos al 4% al inicio de los tratamientos y de limo cercanos o inferiores al 40%, los cuales poseen una relación inversa y directa respectivamente, respecto a la compactabilidad del mismo, según lo relatado por Pecorari et al. (1993), Thomas et al. (1996) y Demmi y Puricelli (1987). Tampoco es posible visualizar a través de los distintos parámetros evaluados, mejoras en el estado físico del suelo, producto del uso del cincel como herramienta de labor profunda tal como afirmaran Silenzi et al. (1996) y Marelli y Arce (1999), luego de 2 años de realizadas las labores de cincelado. En función de ello, de haber existido efectos benéficos, su duración es sumamente limitada y no acumulativa.

Tal como fuera dicho en forma precedente, los efectos del tráfico parecieran ser más importantes que los ocasionados por las máquinas de labranza en estas condiciones, en las cuales el tránsito cubriría al menos una vez la superficie durante un ciclo completo de cultivo (Gaultney et al., 1982)

Test de Proctor

En el gráfico 28, se visualizan los valores medios de los ensayos de compactación Proctor para los distintos estratos del suelo en cada uno de los sistemas de labranza. A nivel superficial (0-0,20 m) el suelo bajo el sistema AR alcanzó los mayores valores de densidad aparente, mientras que el suelo bajo siembra directa obtuvo los menores registros, siendo el valor de SDC intermedio

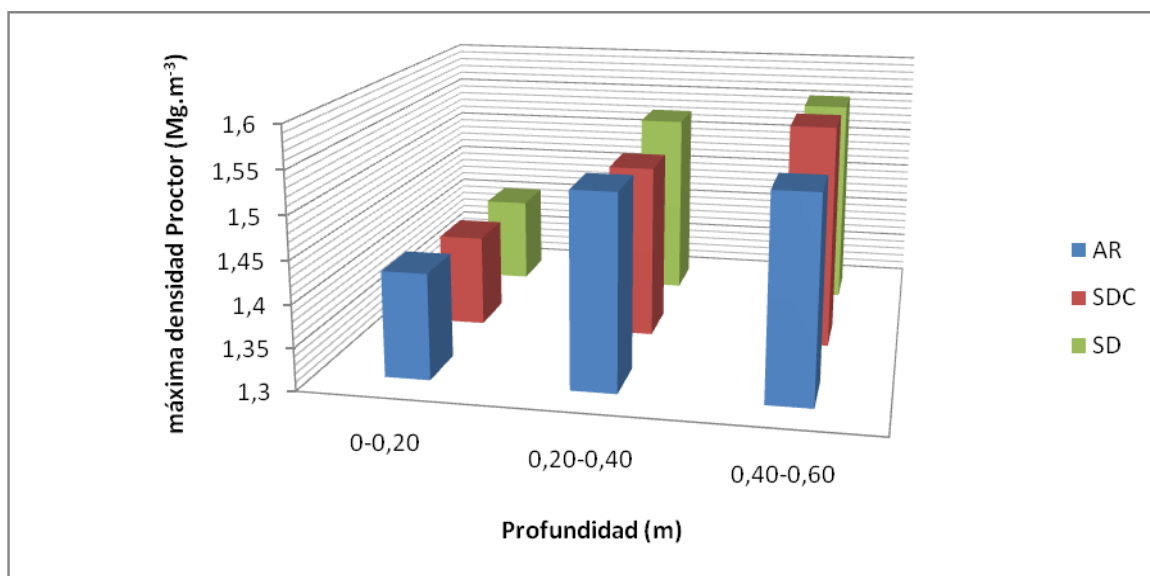


Gráfico 28. Valores de Máxima Densidad Proctor para los distintos tratamientos de labranza y estratos del suelo.

A nivel estadístico, únicamente el tratamiento AR fue significativamente mayor que SD, no diferenciándose de SDC como así tampoco éste de SD. Por debajo de los 0,2 m, no se encontraron diferencias entre ningún tratamiento, pero los mayores valores en el estrato de 0,4 a 0,6 m correspondieron al tratamiento de SD. Estos resultados pueden explicarse a través de la evolución del suelo a partir de los distintos manejos del mismo, asociados a un mayor contenido de materia orgánica del suelo bajo SD en el estrato superficial del mismo.

En función de ello, se efectuaron determinaciones complementarias de materia orgánica del suelo para el estrato superior, coincidente principalmente con el A_p y el A_{12} . Los resultados muestran un incremento general de la Materia Orgánica para la totalidad de los tratamientos de labranza, lo cual podría atribuirse en parte al mantenimiento de una rotación con predominio de gramíneas en relación a las leguminosas en el lapso de 10 años transcurridos desde la instalación de los ensayos. Por otra parte, el contenido de Materia Orgánica para el tratamiento de SD fue significativamente mayor que el del tratamiento de AR, tal como se visualiza en la Tabla 1

Tabla 1. Resultados del análisis de Materia Orgánica para los primeros 0,2 m de profundidad. Azul, agosto de 2005.

Profundidad (m)	MO (%)		
	SD	SDC	AR
0-0,10	6,41aA	5,66bA	5,65bA
0,10- 0,20	5,82aB	5,53bB	5,50bB

MO: Materia Orgánica; SD: Siembra directa; SDC: Siembra directa de primer año sobre Cíncel; AR: Arado de reja y vertedera. Letras minúsculas diferentes en cada fila indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre tratamientos. Diferentes letras mayúsculas en cada columna indican diferencias significativas ($p < 0.05$) entre estratos para cada tratamiento.

El contenido de materia orgánica fue afectado significativamente por el sistema de labranza y la profundidad a la que se obtuvo la muestra ($p < 0.05$), sin interacción entre ambos factores. La SD presentó niveles de materia orgánica significativamente mayores que SDC y AR en todas las profundidades de muestreo. Las diferencias entre SDC y AR no resultaron significativas para esta variable.

Respecto de la distribución en profundidad, los valores para la capa 0-0,10 m difirieron significativamente respecto de 0,10-0,20 m, siendo más marcada la diferencia entre estratos para SD (Tabla 1).

La mayor acumulación observada en la capa 0-0,05 m para SD, así como la disminución en el valor de materia orgánica con la profundidad para este tratamiento se asoció con una menor incorporación en profundidad de los residuos de cosecha para este sistema de labranza (Unger, 1991; Apezteguía et al., 2000), respecto de los otros sistemas considerados. También puede ser considerada causa de acumulación la menor tasa de mineralización de materia orgánica que se espera para este sistema (Janzen et al., 1998). Los valores de máxima compactación Proctor mantienen, tal como fue informado por Aragón et al. (2000) una relación inversa entre compactabilidad y contenido de materia orgánica.

En el gráfico 28, se muestran los valores de densidad relativa correspondientes al mes de agosto, posterior a la cosecha del cultivo, durante el barbecho previo a la siembra del siguiente cultivo. Resulta interesante visualizar que nuevamente el comportamiento de los tratamientos AR y SD tuvieron tendencias opuestas,

alcanzando los mayores valores relativos AR en profundidad y SD en superficie. Todos los valores fueron elevados, superando en muchos casos aquellos que habitualmente se indican como óptimos para la expresión del máximo rendimiento de los cultivos, tal como informan Håkansson y Liepic (2000). Únicamente en el sistema bajo AR, en los estratos de 0 a 0,20 y 0,20 a 0,40 m se registraron valores inferiores al 90 % de compactación relativa. El sistema bajo SD, en cambio, alcanzó valores inferiores al 92% únicamente en profundidad. Esto indicaría que independientemente de los valores absolutos, el sistema de SD muestra un importante proceso de compactación en los primeros 0,40 m de profundidad.

No existieron, tal como resulta esperable, diferencias en la compactabilidad del suelo en profundidad (0,40 a 0,60 m) para la SD en relación con los otros dos sistemas de labranza, puesto que este estrato del suelo no fue intervenido por las labranzas. A raíz de ello, la menor densidad aparente y menor compactación relativa en profundidad indicarían la presencia de un mayor espacio poroso y mayores posibilidades de acumulación de agua en profundidad para el mismo.

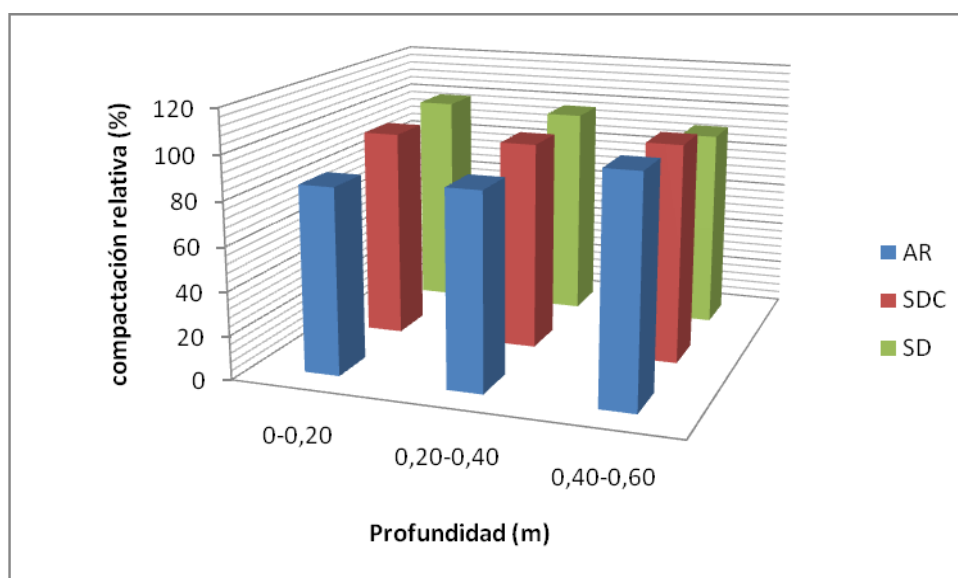


Gráfico 29. Compactación relativa para los distintos tratamientos y estratos evaluados

No obstante ello, es importante recordar que en acuerdo con lo informado por Håkansson y Liepic (2000) los sistemas sin labranza periódica pueden ofrecer un medio adecuado para el desarrollo de los cultivos y la expresión de rendimiento a compactaciones relativas más altas que en los sistemas de labranza con roturación periódica.

En acuerdo con la modelización efectuada por estos autores el grado de compactación relativo óptimo es una función del contenido de arcilla del suelo y del porcentaje de materia orgánica. En función de ello, únicamente es esperable que se encuentren variaciones en los estratos superiores del suelo, en los cuales se producen modificaciones más fuertes de la Materia Orgánica del suelo.

En cuanto a la humedad crítica de máxima compactación, los valores medios de las distintas repeticiones efectuadas se visualizan en el gráfico 30.

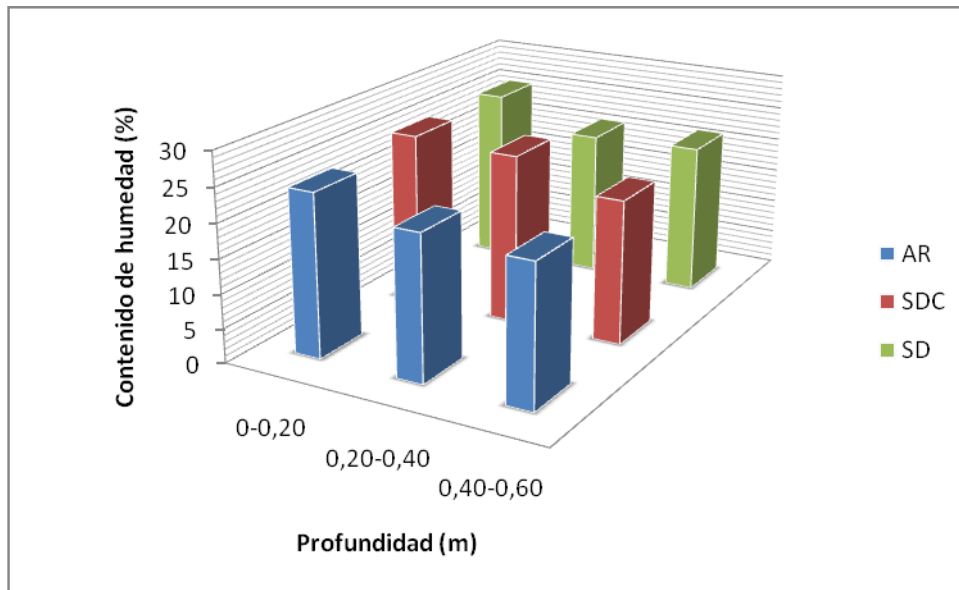


Gráfico 30. Humedad crítica de máxima compactación para los distintos estratos y sistemas de labranza

En el sistema de AR, la humedad a cosecha se alejó de la de máxima compactación a nivel superficial, mientras que por lo contrario se acercó a la misma en los estratos de 0,20 a 0,40 y 0,40 a 0,60 m. Al momento de siembra, en cambio los valores de humedad del suelo se mantuvieron cercanos a los de máxima compactabilidad. Sin embargo en profundidad, las condiciones de humedad a lo largo de la mayoría del ciclo del cultivo habrían limitado en parte los procesos de compactación a nivel subsuperficial. Al momento de cosecha, cuando se producen habitualmente los daños más severos por el tránsito de tractores y máquinas agrícolas, en profundidad la humedad fue del orden del 26% alejada de la humedad proctor de máxima compactación la cual se corresponde con valores del orden del 21% al 22% entre 0,4 y 0,6 m. Por lo contrario, en el estrato de 0 a 0,20 y 0,20 a 0,40, la humedad se mantuvo cercana a 24 % en superficie y del 23% de 0,20 a 0,40 próxima al 25% y 21,6 % de humedad de máxima compactación. Esto podría en parte justificar los mayores valores de compactación relativos alcanzados para dichos estratos en SD.

Lamentablemente, el tránsito durante las labores agrícolas principales como ser la siembra y la cosecha de los cultivos de verano, se efectúan con tenores de humedad elevados y en muchos casos cercanos a los de máxima compactación en acuerdo con el test de Proctor.

Teniendo en cuenta el análisis de resistencia a la penetración y densidad aparente a lo largo del desarrollo del cultivo, podría hipotetizarse que el suelo bajo siembra directa presentó un grado de pre-compactación en los estratos superiores que no alcanzó para limitar los procesos de compactación del suelo en profundidad, pero podría haber atenuado los mismos. No obstante que ello pueda tomarse como un beneficio, el estado mecánico del suelo pareciera que resultó limitante para el desarrollo del cultivo y la posibilidad del mismo de expresar su máximo rendimiento.

Infiltración:

En función de las características de la distribución de frecuencias usuales para esta propiedad del suelo y en acuerdo con Bagarello et al. (2006), se realizó una transformación logarítmica de los valores para su análisis estadístico.

La Tabla 1 resume los resultados correspondientes a la serie de datos de la conductividad hidráulica para los dos niveles de tensión aplicados, calculados utilizando el método Ankeny (Ankeny et al., 1991). Los valores obtenidos de K0 fueron estadísticamente superiores para el tratamiento AR en comparación con SD y SDC. Resultados con tendencias similares fueron informados por Álvarez et al. (2009) sobre suelos con características texturales semejantes. Sin embargo, en dichos estudios los valores de la tasa de infiltración fueron particularmente altos para el tratamiento de labranza convencional (alrededor de 23 cm⁻¹). Además, la relación entre los valores de la tasa de infiltración en la labranza convencional en relación con el tratamiento de siembra directa fue de aproximadamente 4. Por el contrario, en los ensayos realizados en la localidad de Azul esta relación no superó el valor de 1,6. Estas discrepancias pueden ser atribuidas a 2 factores. Por un lado, puede deberse al método de medida utilizado, por otra parte también puede haber incidido el momento de medición, luego de la cosecha del cultivo. Al haber transcurrido, prácticamente un año desde la realización de la labranza con arado de reja y vertedera, es factible que los efectos principales de la labranza convencional sobre suelo hayan disminuido producto de los procesos de consolidación y compactación por tránsito de tractores y máquinas agrícolas. Los resultados sustentan también lo informado por Rasmussen (1999) ya que la infiltración del agua fue mayor bajo laboreo convencional. Por otra parte, resultan coincidentes con los hallados por Álvarez et al. (2006b) para un suelo Paleudol típico franco arenoso, quienes a diferencia de lo ocurrido en un Paleustol éntico franco arenoso registraron una mayor infiltración para el suelo bajo labranza convencional que aquel bajo el sistema de siembra directa. La diferencia de comportamiento entre ambos tipos de suelos fueron atribuidas por los autores a la presencia de un menor número de macroporos para el primero de ellos.

Por lo contrario, los resultados difieren con los incrementos en la tasa de infiltración bajo siembra directa encontrados por Nielsen et al. (2005) y los informados por Steinbach y Álvarez (2007) para su relevamiento de este factor, puesto que la infiltración resultó mayor para el suelo labrado que para el suelo bajo siembra directa. Estos resultados no pueden atribuirse al momento de evaluación puesto que el mismo se hizo prácticamente 9 meses después de efectuada la labranza.

Tabla 1. Valores de K (cm.h⁻¹) para los diferentes tratamientos y tensiones.

h (cm)	AR		SDC		SD	
	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)	Promedio	CV (%)
0	3.42b	39	2.13a	21	2.14a	31
5	0.28a	62	0.20a	32	0.20a	65

El análisis estadístico se efectuó sobre la transformación logarítmica de los resultados. Valores seguidos de diferente letra indican diferencias significativas según el test de tuckey (p≤0,05)

Los resultados guardan coherencia con los niveles de compactación detectados en los diferentes sistemas de labranza en el estrato evaluado por medio de la metodología utilizada. Esto indicaría que la compactación en siembra directa habría afectado los poros de mayor tamaño a nivel superficial (Ankeny et al., 1991) y el flujo del agua ya que el mayor porcentaje de flujo de agua en el suelo también se produce sobre los poros más grandes (Aoki y Sereno, 2004).

En relación al tratamiento de SDC este no difirió estadísticamente del de SD y resultó también significativamente menor que el de AR para los valores de K₀. Esta tendencia también se visualiza en la densidad aparente, prácticamente desde la fecha de siembra y a lo largo de todo el año. Al respecto, Sasal et al. (2006) en tratamientos de labranza con arado de cinceles y siembra directa sobre un suelo franco limoso de la región Pampeana, encontró que la diferencia en la tasa de infiltración se asoció a la rotación de cultivos, siendo mayor para el tratamiento con cinceles cuando la soja fue el cultivo predominante. En cambio, la tasa de infiltración en el sistema de siembra directa alcanzó valores semejantes a los registrados para el tratamiento con cinceles, cuando la soja ocupaba solamente una tercera parte de la rotación de cultivos, proporción similar a la que ocupa este cultivo en la rotación a lo largo del desarrollo del estudio comparativo de sistemas de labranza. A ello se suma que los valores de las tasas de infiltración medida por Sasal et al. (2006) son similares a los valores obtenidos en este ensayo.

Los valores de K₅ no difirieron estadísticamente entre los distintos tratamientos de labranza (Tabla 1). Esto demuestra que la porosidad conductora de agua con radio equivalente <0,3 mm no difirió estadísticamente entre los tratamientos. Este resultado está de acuerdo con lo encontrado por Kay y VandenBygaart (2002), quienes enfatizan que la alteración del suelo por las labranzas es esperable que produzca un aumento, en la macroporosidad de la zona trabajada por los aperos.

En la tabla 2 se visualiza la responsabilidad de la macroporosidad en la conducción del agua. En acuerdo con lo expresado por Beven y Germann, (1982) y Kutilek y Nielsen (1994) se destaca la importancia de la macroporosidad en el flujo del agua del estrato considerado, independientemente del sistema de labranza considerado

La macroporosidad conductora de agua (θ_M) fue significativamente mayor en las parcelas correspondientes al tratamiento AR en comparación con SDC y SD (Tabla 2), siguiendo la misma tendencia que se detalló para K₀. Asimismo, no se observaron diferencias en θ_M , entre SDC y SD. La labranza con arado de reja y vertedera generó macroporos que se mantuvieron hasta cuatro meses después de la cosecha del cultivo de soja. En el sistema de SDC, en cambio, 2 años después de la última labranza con escarificadores de cinceles no se crearon macroporos conductores de agua, persistentes o estables, capaces de sostener condiciones diferentes a las existentes en el sistema de SD, ya que alcanzó durante el barbecho, la misma fracción de θ_M de SD.

Tabla 2. Porcentaje de la porosidad total correspondiente a la macroporosidad conductor de agua (%), Contribución Total al flujo (flujo, in cm h⁻¹) y contribución al flujo de la macroporosidad de conducción de agua en porcentaje (ϕ (%)).

	CT			CP			NT		
	%	flujo	ϕ (%)	%	flujo	ϕ (%)	%	flujo	ϕ (%)
M	0.005	2.13	91.4	0.005	2.12	91.3	0.009	3.42	92.5

En relación a los resultados para el sistema de SD, comúnmente se menciona que en el mismo, se genera progresivamente un aumento de los macroporos, producto del desarrollo radical como así también de la fauna del suelo. Además, se espera que los mencionados bioporos sean estables y capaces de compensar los procesos naturales de consolidación y compactación inducida por tránsito, los cuales asegurarían una cierta continuidad, que daría mayores posibilidades de acumulación de agua, que permitiría mitigar los efectos de sequías estacionales, características

durante el desarrollo de los cultivos estivales en el centro de la provincia de Buenos Aires. No obstante ello, los resultados del ensayo no corroboran dichas expectativas. Esta falta de generación de macroporos en sistemas de Siembra directa fue informado anteriormente en suelos similares, por Sasal et al. (2006).

Por lo expuesto, el comportamiento del tratamiento de SDC mantuvo para ambas determinaciones, K0 y K5, similitud con el de SD. Si bien las determinaciones se efectuaron 1 año después de la realización de los tratamientos de labranza, en el tratamiento de SDC, transcurrieron algo más de 2 años sin remoción mecánica del suelo.

Se observó una correlación positiva significativa entre la conductividad hidráulica saturada, K0, y θ_M , en todos los tratamientos. La dependencia de K0, con θ_M se muestra en la figura. 1.

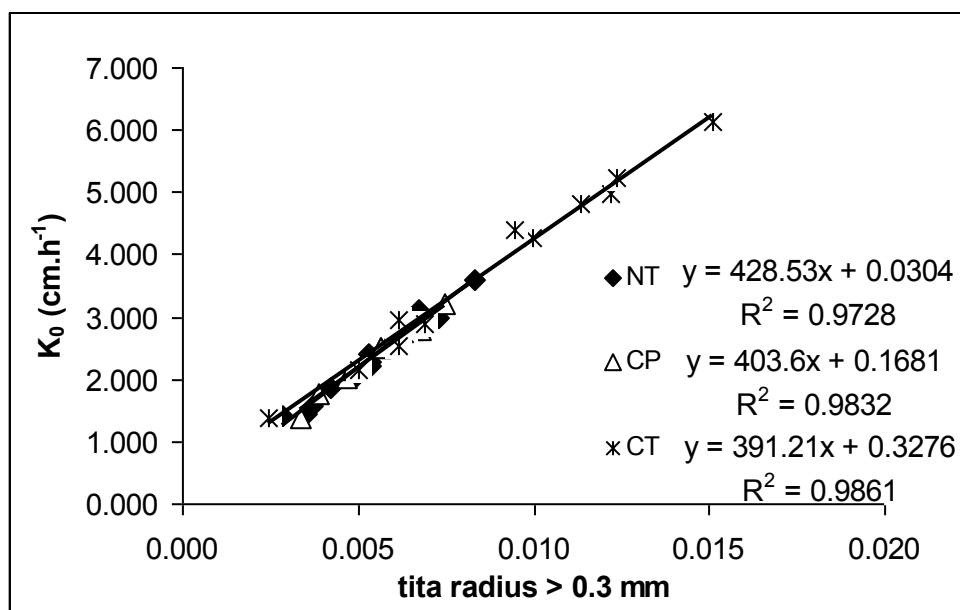


Gráfico 30. Dependencia de K0 con la macroporosidad conductora de agua para los diferentes tratamientos. Las líneas sólidas muestran las regresiones lineales encontradas, las ecuaciones (y) y los coeficientes de correlación (R²) correspondientes. NT: SD; CP: SDC; CT: AR.

Una tendencia similar a la presente fue señalada anteriormente por Capowiez et al. (2009), quienes observaron una correlación positiva significativa entre la tasa de infiltración constante y el número de poros con un diámetro efectivo mayor de 6 mm, determinados mediante análisis de imagen para sistemas de labranza reducida. Estos resultados apoyan la idea que las labranzas afectan el movimiento del agua en el suelo, principalmente mediante la creación de conductos de agua a través de los macroporos.

En un análisis global de los resultados obtenidos para los distintos factores analizados a lo largo del ciclo del cultivo, es evidente que el sistema de SD continua por 10 años presenta un mayor porcentaje de humedad desde el inicio hasta el fin del ciclo pero que sin embargo no pudo ser aprovechado por el cultivo bajo dicho tratamiento de labranza mostrándose el mismo con un peor estado general al momento de la floración.

Por otra parte, el sistema de arado de reja y vertedera mostró en general, exceptuando el momento de cosecha, menores valores de resistencia a la penetración, en comparación con los sistemas sin remoción, acompañados de menores valores tanto de humedad como de densidad aparente del suelo. Los efectos residuales de la labranza con el arado de reja y vertedera pudieron observarse incluso hasta la última fecha de medición realizada 10 meses después de la labranza. A su vez, este tratamiento presentó en la mayoría de las mediciones valores limitantes para el crecimiento radical a mayor profundidad que los tratamientos sin remoción lo que podría justificar el mejor estado general del cultivo observado en el mismo.

Pareciera, en un análisis general de los parámetros físicos del suelo que rápidamente los mismos tienden a la situación de estabilización y comportamiento del sistema de siembra directa sin remoción, cuando se abandona la roturación periódica del mismo.

CONCLUSIONES

El sistema de siembra directa continua permite una mayor acumulación de humedad en el estrato de 0,4 a 0,6 m de profundidad a lo largo de todo el ciclo del cultivo, la cual no resultaría suficiente para atender los requerimientos del cultivo ante la ocurrencia de sequías estacionales prolongadas.

Los tratamientos sin remoción del suelo muestran una mayor resistencia a la penetración que compromete en mayor medida el desarrollo del sistema radical del cultivo, principalmente a nivel subsuperficial.

El sistema de arado de reja y vertedera presenta una menor densidad aparente en comparación con los sistemas sin remoción del suelo para los primeros 0,25 m del perfil, que se mantiene en la totalidad del ciclo del cultivo de maíz.

Los sistemas de Siembra Directa afectan la fertilidad física del suelo como consecuencia de una mayor compactación del mismo.

Los sistemas de labranza afectan la conductividad hidráulica y la conducción del agua por macroporosidad.

La macroporosidad es la principal responsable del flujo total de agua independiente del sistema de labranza

BIBLIOGRAFÍA

AAPRESID. 2006. Siembra Directa: la evolución. <http://www.aapresid.org.ar/elportal/> .

AAPRESID. 2011. Siembra Directa de Cultivos extensivos. <http://www.aapresid.org.ar/>

Alakukku, L 1997. Long-Term soil compaction due to high axle load traffic. Ed. Agricultural Research Centre of Finland. Jokioinen, Finland, 55 pp.

Álvarez, C., Peinemann, N., Scianca, C., Barraco, M. & A. Quiroga. 2006b. Sistemas de labranza , Propiedades edáficas en Molisoles diferenciados por el régimen de humedad. En XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy 19 al 26 de septiembre de 2006. 6 p.

Álvarez, C.R., Taboada, M.A., Gutiérrez Boem, F.H. Fernández, P.L. & P. Prystupa. 2006a. Distintos manejos del suelo en la Pampa Ondulada: I Efecto sobre las

propiedades físicas. En XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy 19 al 26 de septiembre de 2006. 6 p

Alvarez R. & H.S. Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil & Till. Res.* 104: 1-15.

Andrade, A., Cirilo, A., Uhart, S. & M. Otegui. 1996. *Ecofisiología del cultivo de maíz.* Editorial La Barrosa, Balcarce. 292 p.

Ankeny, M.D., Ahmed, M., Kaspar T.C. & R. Horton. **1991. Simple field method for determining unsaturated hydraulic conductivity.** *Soil Science Society of America Journal* 55:467-470.

Aoki, A M & R. Sereno. 2004. Modificaciones de la conductividad hidráulica y porosidad del suelo, estimadas mediante infiltrómetro de disco a tensión. En *Metodologías Físicas para la Investigación del Suelo: Penetrometría e Infiltrometría.* Ed. Filgueira, RR & FG Micucci. Editorial de Universidad de La Plata. pp. 159-180.

Apezteguía, H., Salas, P., Lovera, E., & R. Sereno. 2000. Efecto de las labranzas sobre el contenido de carbono orgánico del suelo. *Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Comisión IV – Trabajo N° 6.* Trabajo completo publicado en CD-Rom.

Aragón, A., García, M.G., Filgueira, R.R. & A. Pachepsky. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test, The relationship with organic carbon and water content *Soil & Tillage Research* 56: 197-204

ASAE Standard. 1993. American Society of Agricultural Engineers (ASAE S 313.2). In *Standad of Soil Cone Penetrometer 40 th ed.* ASAE, St Joseph, MI ASAE. Ed. St Joseph, 1992. p. 611

Bagarello, V., Elrick, D.E., Iovino, M. & A. Sgroi. 2006. A laboratory analysis of falling head infiltration procedures for estimating hydraulic conductivity of soils. *Geoderma* 135: 322-334

Beven, K. & P. German. 1982. Macropores and water flow in soils. *Water Resources Reseach.* 18: 1311-1325.

Botta G., Jorajuria D. & L. Draghi. 2002. Influence of the axle load, tyre size and configuration on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *Journal of Terramechanics* 39 (1): 47-54.

Bragachini, M. 2006. *Mecanización Agrícola en la Argentina: Presente y Futuro. Innovaciones tecnológicas previsibles.* Conferencia del INTA en las Mega Muestras 2006. <http://www.agriculturadeprecision.org/demaaco/articulos/InnovacionesTecnologicasPrevisibles.pdf>. 36 p.

Capowiez, Y., Cadoux, S., Bouchant, P., Ruy, S., Roger-Estrade, J., Richard, G. & H. Boizard. 2009. The effect of tillage type and cropping system on earthworm communities, macroporosity and water infiltration. *Soil Till. Res.* 105: 209-216.

Carter, M. R. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Canadian Journal of Soil Science, Ottawa* 70: 425-433.

Chagas C., H.J. Marelli, O. Santanatoglia. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un arguicidol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ciencia del suelo* 12:11-16

Collis-George, N. and Yoganathan, P. 1985. The effect of soil strength on germination and emergence of wheat (*triticum aestivum* L.) II. High shear strength conditions. *Aust. J. Soil Research.* 23: 589-601.

Cornish, P. S. & J. R. Lymbery. 1987 Reduced early growth of direct drilled wheat in southern New South Wales: causes and consequences. *Australian Journal of Experimental Agriculture, Collingwood,* v. 27, p. 869-880,

- Daddow, R.L. & G.E. Warrington.** 1984. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. USDA - F5, Watershed systems development group REP. WSD6-TN-00005, USDA - FS, Fort Collins, CO.
- Demmi, M. & C. Puricelli.,** 1987. La compactación de los suelos en la región centro este de la provincia de San Luis. INTA San Luis. Argentina. Información técnica N° 111. 30p
- Denton. H.P. & M.G. Wagger.** 1992. Crop and tillage rotations: grain yield, residue cover and soil water. Soil Sci. Soc. Am. J. 56: 1233-1237.
- Dickey, E.C., Shelton, D.P., Jasa, P.J. & T.R. Peterson.** 1985 Soil Erosion from Tillage Systems Used in Soybean and Corn Residues. Transactions of the ASAE, v.28, n.4, p.1124-1129,
- Domínguez, J., Ressia, J.M., Jorajuría, D., Balbuena, R., & G. Mendivil.** 2000. Reología del suelo bajo tres diferentes tratamientos mecánicos. Avances en Ingeniería Agrícola. II Congreso Americano de Ingeniería Agrícola: 110-115.
- Echeverría H. E. & G. A. Studdert.** 2001. Nutrición nitrogenada y sistemas de labranza en maíz. Abril/2001 <http://www.intabalcarse.org/info/documentos/agric/cereales/maiz/fert/nutrinitro.htm>
- Erbach, D., Cruse, R., Crosbie, T., Timmons, D., Kaspar, T. & K. Potter.** 1986. Maize response to tillage-induced soil conditions. Transactions of the ASAE. 29 (3): 690-695.
- Erbach, D.C., Benjamin, J.G., Cruse, R.M., Elamin, M.A., mukhtar, S. & C.H. Choi.** 1992. Soil and crop response to tillage with Paraplow. Trans. ASAE 35:1347-1354.
- Ferreras L., De Battista J.J., Ausilio A. & C. Pecorari.** 1996. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo.
- Filgueira, R.R., C.G. Soracco, G.O. Sarli, & L.L. Fournier.** 2006. Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. Ciencia del Suelo, 24 (1): 39-49.
- Finlay, M.J., Tisdall, J.M. & B.M. McKenzie.** 1994. Effect of tillage below the seed on emergence of wheat seedlings in a hardsetting soil. Soil & Tillage Research 28: 213-225.
- Flowers, M.D. & R. Lal.** 1998 Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic achraqualf in northwest Ohio. Soil & tillage Research, 48: 21-35.
- Franzluebbers, A.J. & J.A., Stuedemann.** 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. Soil Till. Res. 100: 141–153.
- Gaultney, L, Krutz, G., Steinhardt, G. y & J. Liljedahl.** 1982. Effects of subsoil compaction on corn yields. Transactions of the ASAE. Vol 25: 563-569, 575.
- Gayle, G., Raczkowski, C. & R. Mwazi.** 1992. Tillage and wheel-traffic effects on soil properties and root growth. ASAE paper N° 921556.
- Gómez, J.A., Giráldez, J.V., Pastor, M. & F. Fereres.** 1999. Effects of tillage method on soil physical properties, infiltration and yield in an olive orchard. Soil & Tillage Research. 52, 167-175.
- Griffith, D., Manering, J. & J. Box.,** 1986. Soil and moisture management with reduced tillage. En: Sprague, M. y Triplett, G.. No-tillage and Surface Tillage Agriculture. John Wiley & Sons. USA. pp 20
- Hadas, A. & E. Stibbe.** 1977. Soil crusting and emergence of wheat seedlings. Agron. J., 69: 547-550.
- Håkansson, I & B Danfors.** 1981 Effects of heavy traffic on soil conditions and crop growth. In: Proceedings of 7th.Int. Conf. of ISTVS, Ed.: ISTVS Hanover, NH, USA

- Håkansson, I. & J. Lipiec.** 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Till. Res.* 53: 71–85.
- Hernández, R.M., Florentino A. & D. López-Hernández.** 2000. Efectos de la siembra directa y la labranza convencional en la estabilidad estructural y otras propiedades físicas de ultisols en el [Estado](#) de Guarico-[Venezuela](#). *Agronomía Tropical.* 50: (1): 9-29.
- Ismail, I., Blevins, W. & W. Frye.** 1995. Long-term no-tillage effects on soil properties and continuous corn yields. *Soil Science Society of American Journal.* 58: 193-198.
- Janzen, H.H., Campbell, C. A., Izaurralde, R.C., Ellert, B.H., Juma, N., McGill, W.B. & R.P. Zentmer.** 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian prairies. *Soil and Tillage Research* 47: 181-195.
- Jorajuría, D. & L. Draghi.** 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola Parte I: Influencia del peso y del número de pasadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental,* 4 (3): 445-452.
- Kay, B.D. & A.J. VandenBygaart.** 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66: 107-118.
- Kutilek, M. & D. R. Nielsen.** 1994. *Soil Hydrology.* Catena. Germany. 370 pp.
- Leiva, P. & D. Hansen.** 1984. Las resistencias mecánicas del suelo y el desarrollo radicular con distintos sistemas continuos de labranza. *Carpeta de producción vegetal.* Estación Experimental de Pergamino INTA. Argentina. Tomo 4: 181-185.
- Lipiec, J., Håkansson, I., Tarkiewicz, S. & J. Kassowski.** 1991 Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil and Tillage Research, Amsterdam* 19: 307-317,
- López-Fando, C., Dorado, J., & M.T. Pardo.** 2007. Effects of zone-tillage in rotation with no-tillage on soil properties and crop yields in a semi-arid soil from central Spain. *Sol Till. Res.* 95: 266–276.
- Mahboubi, A. A., Lal, R. & N. R Faussey.** 1993 Twenty-eight years of tillage effects on two soils in Ohio. *Soil Science Society of America Journal, Madison* 57: 506-512.
- Marelli, H. & J. Arce.** 1999. Management of alfalfa based mixed pastures in Northern Rippled Pampa, Argentina. In: *Proceedings of International Symposium. Grassland Ecophysiology and Grazing Ecology,* Curitiba. Brasil p. 21-24
- Mazzucco, L.** 1979. El piso de arado: un problema del suelo que afecta el rendimiento de los cultivos. *Comunicación de extensión AER INTA Bolivar.* Argentina.
- Mc Vay, K.A., Budde, J.A., Fabrizzi, K., Mikha, M.M., Rice, C.W., Schlegel, A.J., Peterson, D.E., Sweeney, D.W. C. Thompson.** 2006. Management effects on soil physical properties in long-term tillage studies in Kansas. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70: 434–438.
- Miaczynski, C. & J. Tschapek.** 1965. Los suelos de estepa de la región pampeana. *Revista de Investigación Agrícola. Serie 3. Vol 2 (3)*
- Michelena, R., Morrás, H. & C Irurtia.** 1996. Degradación física por agricultura continua en un suelo Franco limoso de la Prov. de Córdoba. *Actas del XV Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo, La Pampa.*
- Mora Gutiérrez M.V., Ordaz Ch., J.Z. Castellanos, A. Aguilar Santelises, F. Gavi & V. Volke.** 2001. Sistemas de labranza y sus efectos en algunas propiedades físicas en un Vertisol, después de cuatro años de manejo
- Nacci, S. & I. Pla Sentis.** 1992. Estudio de la resistencia a la penetración de los suelos con equipos de penetrometría desarrollados en el país. *Agronomía Trop.* 42:1-2, 115-132
- Negi, S., Mc.Kyes, E., Taylor, F., Douglas, E. & G. Raghavan.** 1980. Crop performance as affected by traffic and tillage in a clay soil. *Transactions of the ASAE.* 23 (4): 1364-1368.

- Nesmith, D. S., Radcliffe, D. E., Hargrove, W. L., Clark, R. L. & E. W. Tollner.** 1987. Soil compaction in double-cropped wheat and soybeans on an Ultisol. *Soil Science Society of America Journal*, Madison 51: 183-186,
- Nielsen, D.C., Unger, P. & P.R. Miller.** 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the Great Plains. *Agron. J.* 97: 364–372.
- Norma IRAM N° 10511/72.** 1972. "MECÁNICA DE SUELOS – Método de Ensayo de Compactación en Laboratorio".
- Oussible, M., Crookston, R. K. & W. E. Larson.** 1992 Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat. *Agronomy Journal*, Madison 84: 34-38,
- Pecorari, C., Andriulo, A. & A. Ausilio.** 1993. Aptitud físico-mecánica de los suelos para el laboreo. II: Efectos de la textura y de la materia orgánica sobre la densidad aparente máxima de algunos suelos de la región pampeana argentina. Pergamino: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 16 p. (Informe Técnico, 281).
- Perroux, K M & I White.** 1988. Designs for disc permeameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52: 1205-1215.
- Radcliffe, D.E., E.W. Tollner, W.L. Hargrove, R.L. Clark & M.H. Golabi.** 1988. Effect of tillage practices on infiltration and soil strength of a Typic Hapludult soil after 10 years. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52: 798-804.
- Rasmussen, K.J.** 1999. Impact of ploughless soil tillage on yield and soil quality. *Soil & Till. Res.* 53: 3–14.
- Rivas, E.** 1998. Efecto de la labranza sobre las propiedades físicas y químicas del suelo y el rendimiento de maíz en los llanos altos del estado Monagas. *Agron. Trop.* 48:2, 157-174.
- Robins, J.S. & C.S. Domingo.** 1953. Some effects of severe soil moisture deficits at specific growth stages in corn. *Agronomy Journal*, 45: 618-621.
- Sasal, M.C., Andriulo, A.E. & M.A. Taboada.** 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Schmidt, C. P. & R. K.Belford.** 1994 Increasing the depth of soil disturbance increases yields of direct drilled wheat on the sandplain soil of Western Australia. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, Collingwood, v. 34, p. 777-781,
- Senigagliesi, C. & M. Ferrari.** 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *Crop Science*. Vol 33: 27-35
- Shaw, R.H.** 1988. Climate requirement. En: G.F. Sprague y J.W. Dudley (eds). *Corn and Corn Improvement* (3° ed.) Series Agronomy N° 18, 608-638. American Society of Agronomy Inc. Publishers. Madison. Wisconsin, USA.
- Silenzi, J.C., N. Echeverria & T. Grossi.** 1996. Efecto del cincelado sobre las propiedades físicas del suelo con piso de arado y la producción forrajera de avena. *Actas. IV Congreso Argentino y II Internacional de Ingeniería Rural*. Buenos Aires, Argentina
- Siri-Prieto, G., Wayne Reeves, D. & R.L. Raper.** 2007. Tillage systems for a cotton-peanut rotation with winter-annual grazing: impacts on soil carbon, nitrogen and physical properties. *Soil Till. Res.* 96: 260–268
- Smith, H. & L. Dickson.** 1990. The contribution of vehicle weight and ground pressure to soil compaction. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 46: 13 - 29.
- Soane, B. D., J. W. Dickson & D. J. Campbell.** 1982. Compaction by agricultural vehicles: A review III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil and Tillage Res.* 2: 3-36.

- Steinbach, H.S. & R. Álvarez.** 2007. ¿Afecta el sistema de labranza las propiedades físicas de los suelos de la región pampeana? *Informaciones Agronómicas del Cono Sur* 33: 7-12.
- Strudley, M.W., T.R. Green & C.A. Ascough II.** 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Till. Res.* 99: 4-48.
- Swan, J., Moncrief, J. & W. Voorhees.** 1987. Soil compaction. Causes, effects, and control. AG-BU-3115. Minnesota Extension Service. University of Minnesota. USA.
- Taboada, M. A., Micucci, F. G., Cosentino, D. J. & R. S. Lavado.** 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the Rolling Pampa of Argentina. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam 49: 57-63,
- Tebrugge, F. & R.A. During.** 1999. Reducing tillage intensity—a review of results from a long-term study in Germany. *Soil Till. Res.* 53: 15–28.
- Thomas, G. W., Haszler, G. R. & R. L. Blevins.** 1996. The effects of organic matter and tillage on maximum compactability of soils using the Proctor test. *Soil Science*, Baltimore, v. 161, p. 502-508,
- Treadgill, E.** 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE*. Vol 25: 859-863, 867.
- Tuda, J.I., Díaz, D.H. & P.H. Apezteguía.** 2006. Evolución de la densidad aparente en un ensayo de labranza de larga duración. En XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. pp. 19–22.
- Unger, P. W.** 1991. Organic matter, nutrient and pH distribution in no- and conventional-tillage semiarid soils. *Agronomy J.* 83: 186-189.
- Van den Akker.** 1998 Prevention of subsoil compaction by defining a maximum wheel load bearing capacity. In: *Soil compaction and compression in relation to sugar beet production*. Editors: Märlander, Tijink, Hoffmann and Beckers, 1: 43-54.
- Vehimeyer, F.J. & A. H. Hendrickson.** 1948. Soil density and root penetration. *Soil Science*, 65: 487-493
- Vetsch, J.A. & G.W. Randall.** 2002. Corn production as affected by tillage systems and starter fertilizer. *Agron. J.* 94: 532–540.
- Vetsch, J.A., Randall, G.W. & J.A. Lamb.** 2007. Corn and soybean production as affected by tillage systems. *Agron. J.* 99: 952–959.
- Voorhees, W. B. & M. J. Lindstrom.** 1984 Long-term effects of tillage method on soil tilt independent of wheel traffic compaction. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 48, p. 152-156,
- Wang, S.Y. & A.M. Faust.** 1986. Effect of growth retardants on root formation and polyamine content in apple seedlings. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 111:912-917.
- Zeljkovich, L. T. de & M. Ferrari.** 1991. El agua del suelo y la productividad de los cultivos en la región de Pergamino (Bs. As.). *Información N° 71 Carpeta de producción vegetal*. INTA Pergamino. Argentina.