

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE RÍO CUARTO
FACULTAD DE AGRONOMÍA Y VETERINARIA**

**“Trabajo Final presentado
para optar al Grado de Ingeniero Agrónomo”**

***EVALUACIÓN DE LA COMPACTACIÓN Y DESCOMPACTACIÓN
EN UN HAPLUDOL TÍPICO SOMETIDO A UNA HISTORIA DE
SIEMBRA DIRECTA***

Alumno: Príncipe, Lucas Gastón

DNI: 30.095.364

Director: Cholaky, Carmen

Co-Director: Bricchi, Estela

Río Cuarto - Córdoba

Septiembre de 2011

AGRADECIMIENTOS

A Cecilia, mi mujer, y a toda mi familia por el esfuerzo que realizaron y el apoyo que me brindaron para que logre finalizar mi carrera.

A Carmen y Estela, mis directoras por su gran ayuda para la realización de este trabajo.

A la Universidad Nacional de Río Cuarto por la oportunidad ofrecida para formarme profesionalmente.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
SUMARY	2
CAPITULO 1.	
Introducción	3
1.1. Presentación, fundamentación e importancia del trabajo	3
1.2. Antecedentes	4
1.2.1 Efecto de los sistemas de labranza y rotaciones sobre las propiedades edáficas	4
1.2.2. Efectos de un sistema de siembra directa sobre la compactación del suelo	5
1.2.3. Efecto de las labores de remoción profunda, sobre la compactación	6
1.2.4. Evaluación de la compactación del suelo	7
1.3. Hipótesis y objetivos	8
1.3.1. Hipótesis general y específicas	8
1.3.2. Objetivos general y específicos	8
CAPITULO 2.	
Materiales y Métodos	10
2.1. Caracterización del área de estudio	10
2.2. Descripción del ensayo experimental	12
2.3 Análisis estadístico	14
2.4. Descripción de las determinaciones realizadas	15
2.4.1. Perfil cultural	15
2.4.2 Peso específico aparente	16
2.4.3 Compactación máxima	16
2.4.4. Compactación relativa	17
CAPITULO 3.	
Resultados y Discusión	18
3.1. Perfil cultural	18
3.2. Peso específico aparente	24
3.2.1. Evolución del peso específico aparente	24
3.2.2. Efecto de la labor de subsolado	26
3.3. Compactación máxima	29
3.4. Compactación relativa	31
CAPITULO 4.	
Conclusiones	35
CAPITULO 5.	
Bibliografía	36

ÍNDICE DE FOTOS, TABLAS Y FIGURAS

FOTOS

Foto 2.1. Escarificador utilizado para el experimento	13
Foto 2.2. Situación con mínimo disturbio	14
Foto 2.3. Grilla utilizada para la determinación del perfil cultural	15
Foto 3.1. Perfil del tratamiento Siembra directa sin descompactación subsuperficial	19
Foto 3.2. Perfil del tratamiento CS	21
Foto 3.3. Perfil de la situación con mínimo disturbio	22
Foto 3.4. Efecto del subsolado sobre el enraizamiento del cultivo	29

TABLAS

Tabla 2.1 Características morfológicas del suelo del sitio bajo estudio	11
Tabla 2.2 Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo del sitio Experimental	12
Tabla 3.1. Descripción del perfil cultural del tratamiento siembra directa sin descompactación subsuperficial	19
Tabla 3.2. Descripción del perfil cultural del tratamiento siembra directa con descompactación subsuperficial	20
Tabla 3.3. Descripción del perfil cultural de la situación con mínimo disturbio	22
Tabla 3.4. Evolución del PEA promedio de todas las capas del perfil cultural	24
Tabla 3.5. Evolución del PEA de cada capa del perfil cultural	25
Tabla 3.6. Efecto del subsolado sobre el PEA promedio de todas las capas	26
Tabla 3.7. Efecto de la labor de subsolado sobre el PEA en cada capa del perfil cultural	27
Tabla 3.8. Evolución del PEA_{max} y $HPEA_{max}$	30
Tabla 3.9. Evolución de la CR según Cambell en cada capa del perfil cultural	32
Tabla 3.10. Efecto del subsolado sobre la CR	33

FIGURAS

Figura 3.1. Perfil cultural de tratamiento SS	18
Figura 3.2. Perfil cultural de tratamiento CS	20
Figura 3.3. Curvas de PEA y contenido hídrico	30
Figura 3.4. CR y sus componentes según Carter y Cambell	33

ÍNDICE DE ANEXO

Foto 1. Cobertura superficial en el tratamiento SS	43
Foto 2. Raíces creciendo en forma horizontal sobre el subhorizonte H ₆ en tratamiento	43
Foto 3. Estructura del subhorizonte H ₅ en el tratamiento CS	44
Foto 4. Estructura subhorizonte H ₈ en el tratamiento SS	44
Foto 5. Estructura de la capa de 0 – 6 cm en la situación ND	45
Foto 6. Estructura de la capa de 6 – 28 cm en la situación ND	45
Foto 7. Estructura de la capa de 0 – 6 cm en la situación ND	46
Foto 8. Condición superficial en la situación ND	46
Figura 1. Disposición del ensayo experimental	47

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue evaluar la evolución de la compactación de un suelo sometido a 14 años de siembra directa y el efecto de la implementación de una labor de descompactación subsuperficial para revertir dicho fenómeno. Para evaluar la evolución de la compactación se utilizó al peso específico aparente (PEA) como indicador de la magnitud de la compactación, comparándose valores de esta variable obtenidos en los años 2002 y 2009. A su vez se compararon con una situación con mínimo disturbio (ND). Se relativizó el grado de compactación que la parcela bajo siembra directa presentó en los años antes mencionados a la situación ND, por medio de la ecuación de compactación relativa (CR) de Campbell. Para el cálculo de ésta ecuación fue necesario determinar el peso específico aparente máximo (PEA_{max}) a través del test de Proctor, a su vez se analizó la evolución a través de los años de ésta última variable. Todo esto se evaluó en tres profundidades del perfil cultural.

El efecto que provocó la labor de descompactación fue evaluado por medio del PEA y la compactación relativa obtenida por la ecuación de Carter.

El PEA y PEA_{max} en la capa superficial disminuyó con respecto al año 2002, mientras que en las capas subsuperficiales se mantuvo constante con respecto al mismo año. La compactación relativa a la situación ND disminuyó con respecto al año 2002 aunque sin alcanzar significancia estadística.

La descompactación subsuperficial no logró disminuir el PEA y CR de Carter, solamente se registró una disminución estadísticamente significativa en la capa superficial del perfil.

Palabras clave: Siembra directa, compactación, descompactación, peso específico aparente, compactación relativa.

SUMMARY

The aim of this study was to evaluate the compactation evolution of soil compaction under 14 years of no-tillage and the effect of the implementation of a subsurface subsoiling work to reverse this phenomenon. To assess the evolution of the compaction was used when the bulk density (PEA) as an indicator of the magnitude of compaction, by comparing values for this variable obtained of the years 2002 and 2009. At the same time were compared with a situation with minimal disturbance (ND), by means of the Campbell equation of relative compaction (CR). For the calculation of this equation was necessary to determine the maximum bulk density (PEA_{max}) through the test proctor, in turn examined the evolution through the years of the latter variable. All this were evaluated at three depths of the cultural profile.

Of the effect of the work of subsoiling was evaluated by the PEA and relative compaction on the Carter equation obtained.

The PEA and PEA_{max} in the surface layer decreased from the year 2002, while the subsurface layers remained constant over the same year. Relative compaction on the situation ND decreased compared to 2002 but without reaching statistical significance.

Subsurface subsoiling did not reduce the PEA and Carter CR, only was register a statistically significant decrease in the surface layer of the profile.

Keywords: no-tillage, compaction, subsoiling, bulk density, relative compaction.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 PRESENTACIÓN, FUNDAMENTACIÓN E IMPORTANCIA DEL TRABAJO

Los suelos son el centro de la vida, y los procesos que ocurren en él son componentes cruciales del ecosistema global. El crecimiento de la agricultura en el cono sur ocurre simultáneamente junto a enormes modificaciones en la tecnología y estructura de producción. Ante tantas posibilidades de cambio, la sustentabilidad de los sistemas productivos debe ser analizada con el objetivo de capitalizar todas las oportunidades y anticipar potenciales problemas (Díaz – Rosello, 2005).

Si bien los avances tecnológicos han producido importantes aumentos en la producción de granos y han tenido en cuenta ciertos aspectos en la conservación de recursos naturales, han dejado de lado otros, resultando los primeros insuficientes para lograr un desarrollo sustentable de las unidades de producción. Se estima que un 40 % del territorio Argentino está afectado por procesos de degradación de sus tierras, y entre otros se menciona la pérdida de las propiedades físicas y químicas naturales de los suelos (SAGyPy CFA, 1995).

Uno de los principales problemas físicos que surgen del uso y manejo del suelo es la compactación (Soane y van.Ouwerkerk, 1994; Quiroga *et al.*, 1999). Para Sánchez Girón (1996) el suelo agrícola está compactado cuando se ha roto el equilibrio entre las unidades estructurales, la estabilidad de las mismas, los poros, las grietas y las fisuras. La ocurrencia de este fenómeno en suelos agrícolas afecta el crecimiento de las raíces y la productividad de los cultivos, los requerimientos de energía para las operaciones de labranza, el movimiento de agua, la infiltración, la erosión y otros procesos. Ésta depende de alguna de las propiedades de los suelos tales como su textura, contenido de materia orgánica y humedad del suelo en el momento de ocurrir el estrés de compactación (Díaz-Zorita y Álvarez, 2006). Habiéndose identificado entre sus principales causas el excesivo laboreo, la remoción de la cobertura superficial y el tráfico de vehículos (Greenland, 1981; Packer *et al.*, 1992).

La siembra directa, en gran auge en la actualidad, es un sistema conservacionista que tiene aspectos muy positivos, como la mejora de la infiltración y almacenamiento de agua, además de la reducción de las pérdidas de suelo por erosión. Pero numerosos autores han comprobado que tiene efectos no deseados, uno de los más destacados es el aumento del peso específico aparente (PEA) de los suelos que son manejados con este sistema de labranza. Se puede mencionar como causa de estos efectos a la no remoción del suelo que

provocaría una consolidación de las partículas, y el tránsito de maquinarias de gran peso, sobre todo cuando el suelo se encuentra con alto contenido de humedad (Gudelj y Masiero, 2000).

La descompactación o remoción de las capas compactadas del perfil, por métodos mecánicos, es obtenida principalmente a través de la labranza primaria o el subsolado; sin embargo, la compactación puede ocurrir en varios momentos durante el ciclo del cultivo, tanto por ejemplo, durante las labores de siembra, pulverización, cosecha e inclusive la labor de descompactación (Botta *et al.*, 2005).

En este trabajo se evaluó la compactación que presenta un Hapludol típico de textura franco arenoso sometido a 14 años de uso agrícola bajo un sistema de siembra directa, se comparó el nivel de compactación con una situación de mínimo disturbio, se valoró el efecto de la introducción de una labor de subsolado y se analizó la evolución de la compactación a partir de datos recabados en el mismo ensayo experimental 6 años atrás.

1.2. ANTECEDENTES

1.2.1. Efecto de los sistemas de labranza y rotaciones sobre las propiedades edáficas.

Ya desde hace años, distintos autores señalaban que el incremento en la agriculturización produce cambios en las condiciones físicas de los suelos (Cacciavillani, 2005). En la Argentina, a partir de la década del 60 se empiezan a detectar fenómenos de compactación de suelo ligados a mermas en los rendimientos de los cultivos (Miaczynski y Tschapek, 1965).

Las prácticas de manejo tales como: sistemas de labranza y rotaciones de cultivos pueden llegar a modificar las propiedades del suelo desde el punto de vista físico, químico y biológico. Según como se implemente cada una de ellas pueden actuar en forma favorable o desfavorable (Mahboubi *et al.*, 1993).

El uso de un sistema particular de labranza afecta a las propiedades del suelo dependiendo de las características del sitio (suelo, clima) y del número de años desde que el sistema ha sido implementado (Rhoton, 2000). En este sentido Sasal *et al.* (2006) aseguran que la historia agrícola condiciona el impacto de los sistemas de labranza sobre las propiedades físicas de superficie de un suelo.

Existe información con resultados dispares respecto al efecto de los distintos implementos de labranza sobre las propiedades del suelo. El método de labranza puede afectar o no la compactación del suelo. Numerosos autores hallaron valores superiores de peso específico aparente (PEA) en suelos bajo siembra directa comparado con suelos bajo

labranza reducida o convencional, mientras que otros autores no hallaron diferencias entre estos sistemas de labranzas (Elissondo, 2001).

1.2.2. Efectos de un sistema de siembra directa sobre la compactación del suelo.

La siembra directa es un sistema conservacionista difundido en el país especialmente en la región pampeana, estimándose que existen 9 millones de hectáreas en la Argentina (Michelena *et al.*, 2002).

Algunos trabajos, como el realizado por Michelena *et al.* (2002), afirman que esta práctica de no labranza modifica la estructura del espacio poroso y la dinámica del agua, aumentando la infiltración (macroporos) y el almacenamiento del agua, reduciendo la pérdida de suelo por erosión. Sin embargo varios autores han observado que este sistema tiene algunos efectos no deseados en la condición física del suelo. Manso *et al.* (2008) evaluaron la evolución del PEA y la resistencia a la penetración luego de 10 años de un ensayo en el que se realizaba siembra directa y labranza convencional y encontraron mayor dureza en el suelo tratado con siembra directa que en labranza convencional, si bien en algunas profundidades las diferencias no fueron significativas. Los resultados que obtuvieron demuestran un incremento en la compactación de los suelos con los años de agricultura, siendo más notorio bajo siembra directa. En igual sentido Steinbach y Álvarez (2006) estudiaron el impacto de la adopción de siembra directa sobre las propiedades físicas de los suelos pampeanos, a partir de la integración de la información publicada en los últimos 20 años, incluyendo únicamente tratamientos bajo siembra directa, labranza con cincel y labranza con arado de disco o de reja y vertedera. No obtuvieron diferencias entre los tratamientos con cincel y reja, pero si entre estos y siembra directa, bajo este último tratamiento los valores de PEA fueron mayores. Estos autores también concluyeron en que los suelos con valores de PEA bajos son más susceptibles a la compactación por siembra directa. Por otro lado, hay antecedentes que demuestran que la implementación de la siembra directa por un largo periodo tiempo densifica los suelos en los primeros años, pero luego, superficialmente el efecto tiende a revertirse debido probablemente a los incrementos de materia orgánica en esos primeros centímetros y a la actividad biológica que produce la continuidad de este sistema (Gudelj y Masiero, 2000).

Una importante causa de compactación en planteos agrícolas con siembra directa, según Indelángelo *et al.* (2008), es el tránsito de maquinaria. Estos autores, después de evaluar el impacto de equipos de cosecha en condiciones de saturación hídrica encontraron

que los contenidos hídricos elevados, sobre todo en suelos de textura fina, magnifican los efectos del tránsito.

En el año 2002, Parra (2004) realizó estudios en el sitio donde se llevó a cabo el presente trabajo, encontrando valores significativamente mayores de peso específico aparente en las parcelas bajo siembra directa (parcelas donde se realizaron los estudios para este trabajo) que en las que se realizó labranza reducida y convencional, el autor indicó que la ausencia de labores de aflojamiento tiene que ver con este resultado. También analizó la compactación máxima en cada labranza, y solo obtuvo una variación significativa en la capa superficial del perfil cultural en el sistema de siembra directa, siendo ésta menor en comparación a las demás labranzas, lo que el autor relacionó al mayor contenido de materia orgánica total que observó en ese tratamiento.

1.2.3. Efecto de las labores que producen remoción profunda del suelo, sobre la compactación edáfica.

La descompactación por métodos mecánicos es obtenida principalmente a través del subsolado. Las herramientas de labranza vertical como medio de lucha contra la compactación, permiten fragmentar las capas del suelo restrictivas sin causar una destrucción severa de los agregados y mantienen la superficie protegida mediante la escasa incorporación de residuos (Clark *et al.*, 1993).

La labor de descompactación en profundidad según Hakasson y Reeder (1994) puede ser un problema cuya resolución conlleva complicaciones técnicas por las altas demandas de potencia y equipos de labranza menos frecuentes y, a veces, imposible de resolver en términos económicamente viables.

Elissondo *et al.* (2001) al investigar el efecto de un sistema de siembra directa y uno de labranza vertical sobre la densidad aparente (DAP), observó valores mayores de este parámetro en el primero de los sistemas. Además según Ressa *et al.* (1998), aparte del efecto beneficioso sobre la compactación, el subsolado aumenta la capacidad de almacenaje de agua del suelo.

Los beneficios de la remoción de la descompactación se ponen en evidencia a través de los rendimientos de los cultivos. En este sentido Botta *et al.* (2005), al evaluar el efecto de la descompactación sobre el rendimiento en el cultivo de girasol, concluyeron que la remoción por subsolado de la compactación subsuperficial del suelo originada por las repetidas labores agrícolas y los distintos manejos a los que es sometido, produjo un aumento en el rendimiento de este cultivo. En coincidencia, Rollan *et al.* (2004) recomiendan

considerar tareas de remoción del suelo, a partir de niveles críticos de densidad aparente, ya que como coinciden varios autores la siembra directa implementada durante muchos años sin remoción del suelo tiene un efecto muy importante sobre la compactación subsuperficial. De igual manera, Rangeon *et al.* (2008) sugieren que la labranza vertical puede ser una alternativa en suelos que necesiten descompactación. Según Cholaky (2003) el efecto de la remoción de la descompactación persiste al menos dentro del ciclo del cultivo siguiente.

1.2.4. Evaluación de la compactación del suelo.

Un parámetro para dimensionar el problema de la compactación es el peso específico aparente (PEA) como un indicador importante de la impedancia física que puede ofrecer una porción determinada del perfil, pudiendo afectar la germinación, implantación, desarrollo radical, aireación y acumulación de agua en el suelo (Rollán *et al.*, 2004).

Al evaluar el efecto de diferentes sistemas de cultivo y de labranzas sobre posibles indicadores de calidad de suelo, Aoki *et al.* (2008), encontraron que el PEA estaría indicando eficientemente tendencias del efecto de los diferentes sistemas de labranza sobre la compactación del suelo. Pero hay quienes afirman que para evaluar el problema de compactación no sería suficiente el PEA, ya que presenta poca sensibilidad al comparar diferentes manejos del suelo, por lo tanto puede ser conveniente usar medidas de referencia (PEA máximo) o relativas (Compactación Relativa) para darle una mejor interpretación a este valor (Parra *et al.*, 2008).

Numerosos autores (Zhang *et al.*, 1997; Quiroga *et al.*, 1999; Nhantumbo y Cambule, 2006), han utilizado la prueba Proctor para caracterizar la variación de los parámetros que se vinculan a la compactación, aunque son escasas las investigaciones donde se utiliza como una prueba para el diagnóstico del estado de compactación del suelo (Ferrerías *et al.*, 2007).

Parra *et al.* (2008) evaluaron la compactación en suelos bajo uso agrícola con diferentes manejos y concluyeron que la compactación relativa no difirió entre tratamientos, solamente observaron que fue mayor en los horizontes subsuperficiales. Este resultado tuvo más significancia en tratamientos bajo siembra directa que con otras labranzas. Estos autores indican que esto se puede explicar con la relación inversa que hay entre PEA máximo y carbono orgánico (CO). La relación inversa, entre CO y PEA máximo está extensamente comprobada (Howard *et al.*, 1981; Zhang *et al.*, 1997; Aragón *et al.*, 2000; Micucci *et al.*, 2006; Nhantumbo y Cambule, 2006; Ferrerías *et al.*, 2007; Parra *et al.*, 2008; Zhao *et al.*, 2008 entre otros) quienes explicaron cambios en el PEA máximo en función del carbono orgánico (CO) o la granulometría. La mayoría de los estudios muestran una influencia

significativa de la siembra directa en relación a otros sistemas de labranza sobre los contenidos de materia orgánica (Buscchiazzo *et al.*, 1996; Quiroga *et al.*, 1999).

1.3. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

1.3.1. Hipótesis

General: La continuidad de la siembra directa a través del tiempo genera compactación del suelo, que evoluciona de manera diferente para cada capa del perfil del mismo y esta puede ser revertida con la introducción de una operación de subsolado.

Específicas:

1. La implementación continua en el tiempo de un sistema de labranza sin remoción del suelo, como la siembra directa, trae aparejado una disminución del peso específico aparente y la compactación relativa en superficie y un incremento de esta variable en las capas subsuperficiales del perfil cultural.
2. La introducción de una operación de descompactación subsuperficial en un suelo manejado con siembra directa disminuye la compactación en esa zona del perfil cultural generada por la no remoción del mismo.

1.3.2. Objetivos

General: Evaluar la evolución de la compactación de un suelo sometido a una historia de siembra directa y el efecto de la implementación de una tecnología para revertir dicho fenómeno.

Específicos:

1. Comparar el peso específico aparente de cada una de las capas del perfil cultural de una situación bajo siembra directa durante 14 años sin ninguna labor de descompactación con los valores que esta variable tenía 6 años atrás.
2. Evaluar el efecto de una labor de subsolado sobre la compactación en un suelo sometido a siembra directa durante 14 años, mediante el peso específico aparente y compactación relativa.

3. Comparar el peso específico aparente máximo de una situación bajo siembra directa por 14 años con el que ésta misma situación tenía 6 años atrás y con una situación similar con mínimos disturbios.
4. Comparar la compactación relativa que presenta un suelo sometido a un uso agrícola con siembra directa durante 14 años, con la de una situación de mínimo disturbio.
5. Comparar la compactación relativa de una situación bajo siembra directa por 14 años con la compactación relativa que esta misma situación tenía 6 años atrás.

Capítulo 2.

MATERIALES Y METODOS

2.1. Caracterización del área de estudio.

El experimento se realizó en el campo de docencia y Experimentación (CAMDOCEX) de la Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Nacional de Río Cuarto “Pozo del Carril”, ubicado en las cercanías del paraje La Aguada, departamento Río Cuarto (33° 57' Lat. Sur, 64° 50' Long. Oeste), el ensayo se ubica según la clasificación de Becerra (1999), en la unidad ecológica homogénea llanura con invierno seco, cuya superficie dentro de la provincia de Córdoba es de 27.760 km² (Parra, 2004).

El clima es templado subhúmedo, con régimen de precipitaciones monzónico (80 % de las lluvias concentradas en el periodo Octubre – Abril) y con una precipitación media anual de 850 mm. El balance hídrico presenta un déficit de entre 50 y 300 mm/año de acuerdo al régimen de lluvia. Las principales adversidades climáticas son: sequías, heladas extemporáneas, granizo y la intensidad de las precipitaciones (Degioanni, 1998).

El área se caracteriza por presentar un relieve muy complejo, de moderado a fuertemente ondulado determinando un conjunto de lomadas, cuya longitud oscila entre los 3.000 y los 6.000 metros de largo con un gradiente del 2 al 3 por ciento. Localmente se presentan pendientes mas cortas pero de mayor gradiente (Becker *et al.*, 2001). En este área predominan sedimentos de tipo loésicos franco-arenosos muy finos de la formación la Invernada (Cantú, 1992), donde predominan Hapludoles típicos de textura franco arenosa muy fina (Cantero et al., 1984). El suelo del sitio experimental fue clasificado por Becker (2006) como un Hapludol típico, limoso grueso, illítico, térmico, cuyas características se describen en las tablas 2.1 y 2.2.

La región de referencia perteneció a un latifundio (prácticamente en toda su extensión) hasta mediados del siglo XX (Cantú *et al.*, 1992) donde se produce una gran subdivisión de la tierra con la colonización del sector y la incorporación de la agricultura invernada (trigo, lino, avena y centeno). Paulatinamente el maíz fue desplazando a estos cultivos de invierno; en la década del 60 se introduce el girasol y en la del 70 la soja. En la actualidad el uso de la tierra es agrícola-ganadero, el cual fluctúa dependiendo del mercado internacional.

La gran irrupción de la agricultura estival con cultivos cuya restitución de materia orgánica es muy baja, acompañada de un aumento en las labores de siembra y un incremento en el tamaño y peso de las maquinarias, provocó una alteración de las

condiciones físicas (Bricchi, 1996; Cisneros *et al.*, 1996; Degioanni, 1998) y biológicas (Moreno *et al.*, 1996) de los suelos de la región.

Tabla 2.1 Características morfológicas del suelo del sitio bajo estudio (Becker, 2006).

<i>Ap</i> (0-8 cm)	Color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares gruesos moderados con laminación; duro, firme; seco; límite inferior abrupto y suave.
<i>A2</i> (8-14 cm)	Color pardo oscuro (10YR3/3) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares gruesos moderados que rompen a bloques angulares menores; duro, firme; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; seco; límite inferior abrupto y suave.
<i>Bw1</i> (14-29 cm)	Color pardo grisáceo oscuro (10YR 4/2) en húmedo y pardo (10YR 5/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares y prismas simples irregulares, muy gruesos que rompen a bloques angulares y prismas simples gruesos y medios, moderados; ligeramente duro, friable; ligeramente plástico, ligeramente adhesivo; abundantes lamelas discontinuas y onduladas arcillo-húmicas de 2 a 3 mm de espesor, horizontales y subhorizontales que en ciertos puntos se entrecruzan; seco; límite inferior abrupto y suave.
<i>Bw2</i> (29-41 cm)	Color pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en prismas simples irregulares gruesos, moderados que rompen a prismas y bloques menores; blando, friable; escasos barnices arcillo-húmicos, finos sobre las caras de agregados; fresco; límite inferior claro y suave.
<i>BC</i> (41-65 cm)	Color pardo a pardo oscuro (10YR 4/3) en húmedo y pardo amarillento (10YR 5/4) en seco; franco arenoso; estructura en prismas simples y bloques subangulares, finos, moderados a débiles que rompen a bloques menores débiles; blando en seco, muy friable en húmedo; fresco; límite inferior claro y suave.
<i>C</i> (65-85 cm)	Color pardo (10YR 4/4) en húmedo y pardo claro (10YR 6/3) en seco; franco arenoso; estructura en bloques angulares irregulares muy finos y muy débiles; blando, muy friable; fresco; límite inferior abrupto y suave.
<i>Ck</i> (85-+ cm)	Color pardo amarillento (10YR 5/4) en húmedo y pardo claro (10YR 6/3) en seco; franco arenoso; estructura masiva; blando, friable; fresco a húmedo; alto contenido de carbonatos libres.

Tabla 2.2 Propiedades químicas, físico-químicas y físicas del suelo del sitio experimental (Becker, 2006).

<i>Horizonte</i>	Ap	A2	Bw1	Bw2	BC	C	Ck
Profundidad (cm)	0-8	8-14	14-29	29-41	41-65	65-85	85+
CO (%)	1,05	0,56	0,53	0,72	0,24	0,12	-
Arcilla < 2 μ (%)	17,48	12,30	12,50	14,80	13,02	14,50	14,30
Limo, 2-50 μ (%)	30,32	25,20	26,10	24,30	25,20	29,60	29,80
Arena muy fina, 50-100 μ (%)	52,80	61,50	55,60	60,40	60,80	55,30	55,30
Arena fina, 100-250 μ (%)	0,60	0,70	2,20	0,50	0,80	0,60	0,40
Arena media, 250-500 μ (%)	0,25	0,30	3,10	0,10	0,10	0,20	
Arena gruesa, 500-1000 μ (%)	0,08	0,10	0,50	-	-	0,40	
Arena muy gruesa, 1-2 mm (%)	0,01	0,10	-	-	0,20		
pH en agua (1 : 2,5)	6,0	6,57	6,82	6,88	7,09	8,08	8,32

2.2. Descripción del ensayo experimental.

El programa de investigación donde se incluye este trabajo se puso en marcha a partir de agosto de 1994. El programa de referencia incluye dos o tres usos, según el momento que se considere en la rotación: agrícola pura (**A**), agrícola con pastoreo de rastrojo (**AP**) y Agrícola Ganadero (**AG**); dos dosis de fertilización con nitrógeno y fósforo, fertilizado (**F**) y no fertilizado (**NF**) y tres sistemas de labranza: siembra directa (**SD**), labranza reducida (**LR**) y labranza convencional (**LC**). Desde el año 2007 se realiza en una parte de cada tratamiento una labor de descompactación subsuperficial, con escarificador alado similar a la “reja cero” (Cisneros *et al.*, 1998) (**CS**) (Foto 2.1.). Para este trabajo la labor se llevó a cabo en el mes de agosto de 2008, antes de la siembra del cultivo de maíz.

El ensayo original se desarrolló utilizando un diseño experimental en parcelas subdivididas dispuestas en bloques completamente aleatorizados, con dos repeticiones espaciales por tratamiento.

Para la realización de este trabajo se utilizaron los tratamientos de: uso agrícola, fertilizados, en siembra directa con labor de descompactación subsuperficial (**CS**) y siembra directa sin labor profunda de descompactación subsuperficial (**SS**) de cada bloque (ver anexo, figura 1).



Foto 2.1. Escarificador utilizado para el experimento.

Además, se realizaron mediciones en una situación con mínimo disturbio (**ND**), sin antecedentes de intervenciones antrópicas en los últimos 30 años. Esta situación corresponde a un bosque de Eucaliptos y especies invasoras arbóreas y herbáceas (foto 2.2. y foto 8 anexo), ubicado en similar unidad de paisaje compuesto y en la misma posición en él que el ensayo.



Foto 2.2. Situación con mínimo disturbio

Por otro lado, y para analizar la evolución en el tiempo de la variable estudiada, se utilizaron datos obtenidos por Parra en el año 2002 en la realización de su Trabajo Final de Grado: *Efecto de Intervenciones Tecnológicas Sobre Indicadores de la Calidad Física de un Hapludol Típico* (Parra, 2004). Los datos que se utilizaron de este autor son correspondientes al tratamiento siembra directa sin descompactación subsuperficial (**SD 2002**).

2.3. Análisis estadístico.

Para analizar los datos obtenidos se empleó el concepto de un diseño en bloques completamente aleatorizado en parcelas en franjas (Strip – Plot), donde el factor en estudio fue la labor de subsolado en siembra directa, y las franjas fueron las tres profundidades, surgidas de la evaluación del perfil cultural como será explicado mas adelante en este capítulo.

El análisis estadístico de los resultados se realizó a través del software Infostat (Infostat, 2008), utilizando según el caso, el modelo general lineal, prueba de comparaciones múltiples de LSD.

2.4. Descripción de las determinaciones realizadas.

2.4.1. Perfil cultural:

Se establecieron tres niveles de profundidad, en los cuales se realizaron los análisis de las variables bajo estudio, por el método del **perfil cultural**, propuesto por Gautronneau y Manichon (1987). El mismo consiste en realizar una excavación de 1 m de largo en forma transversal a la dirección de la labranza, 0,50 m de ancho y 0,3 m de profundidad, ya que según Parra (2004) es el espesor del perfil que muestra los cambios inducidos por el uso y manejo. Sobre una de sus paredes previamente alisada, se procede a diferenciar, con la ayuda de algún elemento punzante, diferentes zonas del perfil tanto en el sentido vertical como lateral. Las zonas diferenciadas son identificadas mediante palillos punzantes contorneando sus bordes. Sobre esta pared se dispone una grilla graduada (imagen 2.2.), con cuya ayuda se transfiere la forma de las zonas a un papel que reproduce la grilla. Las dimensiones de la grilla a utilizar son de 1 x 0,3 m, siendo cada cuadrado de 0,03 m de lado. El perfil cultural es dividido en subhorizontes o capas (H), de acuerdo a las observaciones morfológicas del estado estructural del suelo, determinado principalmente por las labranzas.

Los subhorizontes o capas (H) que el método define son:

H_0 = Condición superficial.

$H_1 - H_4$ = Capas de labores de repaso.

H_5 = Capa de labranza de corte vertical.

$H_6 - H_7$ = Bases de recientes y antiguas capas labradas.

H_8 = Fondo de antigua capa labrada.



Imagen 2.3. Grilla utilizada para la determinación del perfil cultural.

2.4.2. Peso específico aparente actual (PEA_{act}):

Esta variable se obtuvo de las diferentes capas del perfil cultural 6 meses después de haberse realizado la labor de subsolado, y a similares profundidades en la situación con mínimo disturbio. Para su determinación se recurrió al método del cilindro (Blake, 1986), el cual consiste en introducir en el suelo un cilindro metálico de volumen conocido, a la profundidad deseada y retirarlo cuidadosamente para no alterar la estructura. La muestra así obtenida se seca a 105 ° C, hasta peso constante y se pesa. Relacionando el peso del suelo seco, con el volumen que ocupa la misma (volumen del cilindro), se obtiene el PEA. Para calcular esta variable se extrajeron 6 submuestras de cada repetición y de cada capa el perfil cultural, y además se utilizaron los valores de PEA obtenidos por Parra (2004) en año 2002.

2.4.3. Compactación máxima (PEA_{max}):

Este experimento se realizó mediante la prueba Proctor de compactación máxima (Klute, 1986). Dicha prueba consiste en tomar aproximadamente 2,5 kg de suelo seco al aire previamente tamizado por malla de 4690 micras y colocarla en una bandeja. Con una pieza de madera de sección cuadrada se quiebran los terrones que puedan haber quedado. Se extiende el suelo y con un atomizador se le agrega agua en cantidad variable según la humedad de la muestra hasta aproximadamente 10 – 12 % (g/g). A continuación se mezcla bien con una espátula y se conserva dentro de un recipiente hermético durante 24 hs para lograr una distribución más homogénea de la humedad. Posteriormente dentro del cilindro Proctor de 10,25 cm de diámetro por 11,51 cm de alto, con su base y extensión, se coloca suelo en una cantidad que alcance 8 cm de altura, tras lo cual se imparten 20 golpes de pistón (2,5 kg) que cae libremente a través de una guía galvanizada de 30,5 cm de recorrido, procurando repartirlos en toda la superficie. Esta operación, agregando nuevamente suelo para obtener una segunda capa que junto a la primera dé una altura total de 11 o 12 cm, se repite 2 veces más de modo que el suelo compactado sobrepase la unión del cilindro con el suplemento. Se extrae el suplemento y con la ayuda de un enrazador o cuchillo afilado se elimina lo que sobresale del cilindro, el que posteriormente se pesa. Luego de esta operación se extraen dos alícuotas de la muestra para determinar su grado de humedad tras desecación a 105 ° C, valor que es necesario para el cálculo del peso específico aparente del suelo compactado. A continuación se extrae la muestra del cilindro, se desmenuza y se le agrega agua de modo que su contenido gravimétrico aumente en un 2 ó 3 %, se mezcla y se conserva en el recipiente hermético 24 hs. hasta iniciar nuevamente el proceso. Esta determinación se realizó en cada muestra, hasta alcanzar la máxima compactación a la

humedad gravimétrica a la que se alcanza el PEA_{max} , obteniéndose así las curvas de PEA – contenido de humedad.

Para realizar este experimento se extrajo una muestra de la capa superficial de cada tratamiento y de cada repetición, en el mismo momento en que se extrajeron las muestras para la determinación del PEA. Un procedimiento similar se realizó en la situación con mínimo disturbio.

En el año 2002 Parra para la realización de su Trabajo Final de Grado obtuvo en las mismas parcelas y en todas las profundidades del perfil cultural los valores de PEA_{max} , por lo tanto para este trabajo se muestreó solo el horizonte superficial del perfil cultural ya que se presupuso que era la única capa que podía haber sufrido cambios en el periodo de tiempo transcurrido desde el relevamiento realizado por Parra a la fecha por lo que los valores de PEA_{max} correspondientes a los horizontes profundos que se utilizaron en este trabajo, fueron los obtenidos por Parra en el año 2002.

2.4.4. Compactación relativa:

Este índice se obtuvo de dos maneras diferentes:

- a. De acuerdo a la metodología propuesta por Carter (1990) a través de la relación entre la densidad aparente actual de cada capa y la máxima compactación obtenida mediante el ensayo Proctor, según la siguiente expresión:

$$CR = (PEA_{act}/PEA_{max}) \times 100$$

Donde:

CR: compactación relativa expresada en porcentaje.

PEA_{act} : PEA del horizonte del cual se quiere obtener la compactación relativa (g/cm^3).

PEA_{max} : PEA máximo del horizonte del cual se quiere obtener la compactación relativa obtenida por la prueba Proctor (g/cm^3).

- b. Por la ecuación propuesta por Campbell (1994), la cual se expresa a continuación:

$$CR \text{ (Campbell, 1994)} = [1 - (PEA_{actual} - PEA_{min}) / (PEA_{max} - PEA_{min})] \times 100$$

Donde:

PEA_{min} : PEA actual del horizonte de la situación ND para la misma profundidad (g/cm^3).

El PEA actual y mínimo se obtuvieron de acuerdo a lo explicado en el punto 2.4.2 del presente capítulo.

Capítulo 3.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Perfil cultural

Según esta metodología se detectaron los siguientes subhorizontes o capas (H) al finalizar el ciclo del cultivo de maíz 2008/2009, seis meses después de efectuada la labor de descompactación subsuperficial:

a) En siembra directa sin labor profunda de descompactación (SS):

H_1 : 0 – 3 cm.

H_6 = 3 – 9 cm.

H_8 = 9 – 30 cm (tabla 3.1.)

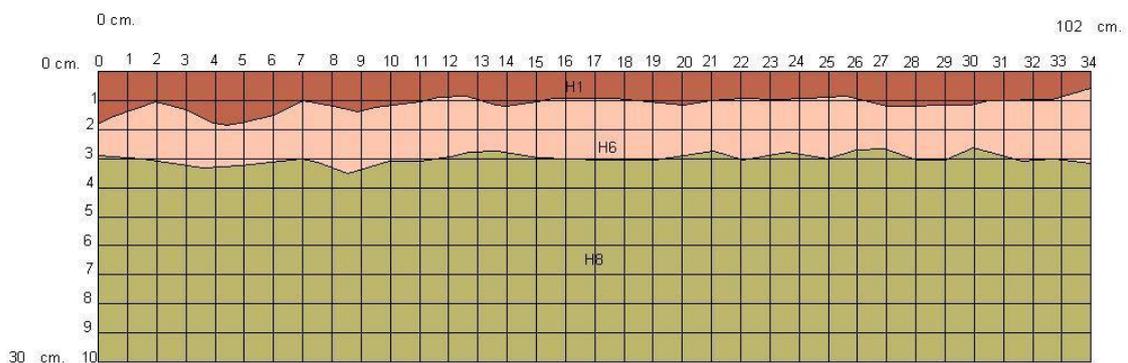


Figura 3.1. Perfil cultural de tratamiento siembra directa sin labor profunda de descompactación (SS).

H₁: 0 – 3 cm	Estructura bloques subangulares, grado débil a moderada, clase fina. Abundantes raíces con función estabilizadora del subhorizonte, con abundante tierra suelta.
H₆ = 3 – 9 cm	Estructura en bloques subangulares, grado moderada, clase media. Abundantes raíces y gran parte de ellas creciendo en sentido horizontal en su parte superior (foto 2 en anexo), se observa gran cantidad de tierra suelta.
H₈ = 9 – 30 cm.	Estructura en bloques subangulares, grado moderado a fuerte, clase media a gruesa, soldados fácilmente discernibles. Raíces menos abundante que en la capa superior creciendo por planos de debilidad de los agregados. La cara interna de los terrones no presenta porosidad visible. Se observa algo de tierra suelta (foto 4 en anexo).

Tabla 3.1. Descripción del perfil cultural del tratamiento siembra directa sin labor profunda de descompactación (SS).



Foto 3.1. Perfil del tratamiento siembra directa sin labor profunda de descompactación SS.

b) En siembra directa con labor profunda de descompactación CS:

H_1 : 0 – 3 cm.

H_5 = 3 – 15 cm.

H_8 = 15 – 30 cm. (tabla 3.2.)

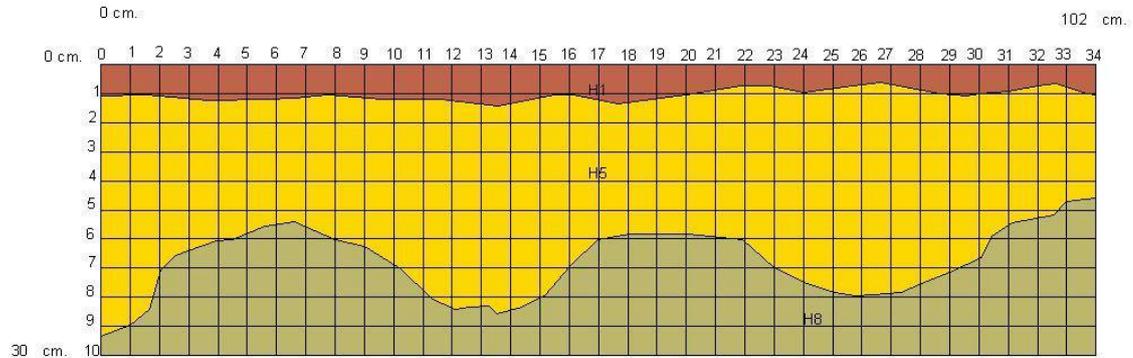


Figura 3.2. Perfil cultural de tratamiento siembra directa con labor profunda de descompactación (CS).

H_1: 0 – 3 cm	Estructura en bloques subangulares, grado débil a moderado clase fina. Abundantes raíces con función estabilizadora del subhorizonte, presencia de abundante tierra suelta.
H_5 = 3 – 15 cm	Presencia de terrones fragmentados pequeños, otros soldados fácilmente discernibles, rompe en bloques angulares, grado débil, clase fina (foto 3 en anexo). Se observan raíces creciendo por planos de debilidad. Se presenta abundante tierra fina suelta.
H_8 = 15 – 30 cm	Estructura en bloques subangulares, grado moderado a fuerte clase media a gruesa, soldados fácilmente discernibles, la cara interna de los terrones no presenta porosidad visible. Raíces no tan abundantes como en la capa superior creciendo por planos de debilidad. Se presenta algo de tierra suelta.

Tabla 3.2. Descripción del perfil cultural del tratamiento siembra directa con labor profunda de descompactación (CS).

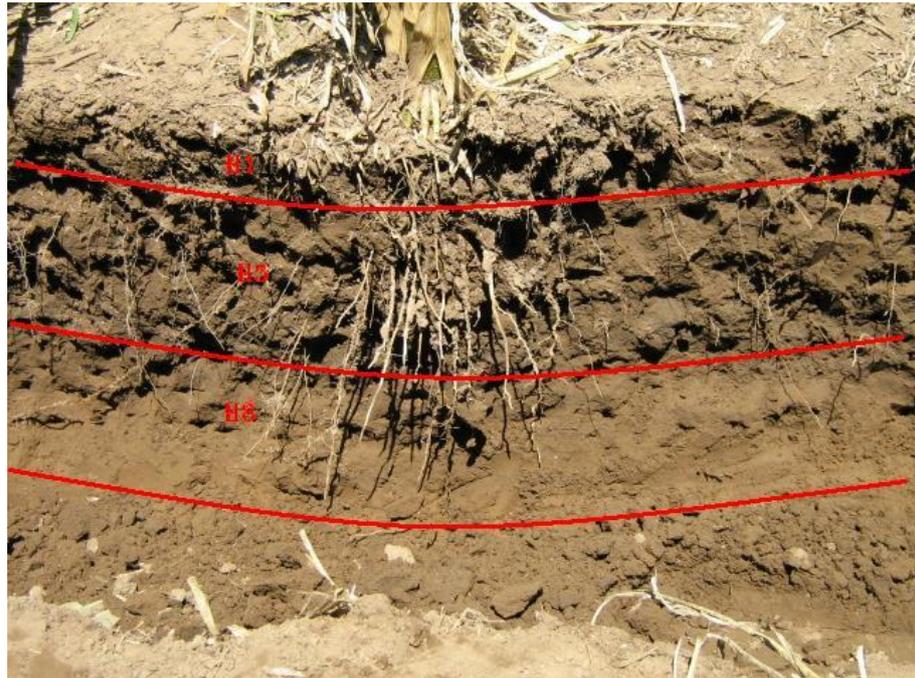


Foto 3.2. Perfil del tratamiento siembra directa con labor profunda de descompactación CS.

c) En el año 2002 (SD 2002):

H₁: 0 – 6 cm.

H₆: 6 – 18 cm.

H₈: 18 – 27 cm.

No se logró recuperar información que describiera este perfil.

d) En situación con mínimo disturbio (ND):

En esta situación no se aplicó la metodología del perfil cultural porque no presentaba historia de labranzas por lo tanto se realizó una caracterización subjetiva encontrándose 3 subhorizontes (foto 3.3.) que se describirán en la tabla 3.3. Se consideraron profundidades de muestreo equivalentes a los demás tratamientos.

0 – 6 cm	Estructura en bloques subangulares, grado débil, clase fina (foto 5. anexo). Se presenta mucha tierra suelta. Se observan profusas raíces.
6 – 28 cm	Estructura en bloques subangulares a angulares, clase media, rompen a bloques pequeños subangulares de grado medio a moderado. Caras de los agregados rugosas con porosidad visible (foto 6. anexo). Color más oscuro que la capa superior. Muestra algo de plasticidad en húmedo, no adhesivo, en seco es friable.
28 - + cm	Estructura en bloques subangulares, grado débil, clase fina. Las caras de los agregados son lisas (foto 7. anexo). Presenta algo de plasticidad en mojado. Se observa de color más claro que la capa superior.

Tabla 3.3. Descripción del perfil cultural de la situación con mínimo disturbio (ND).

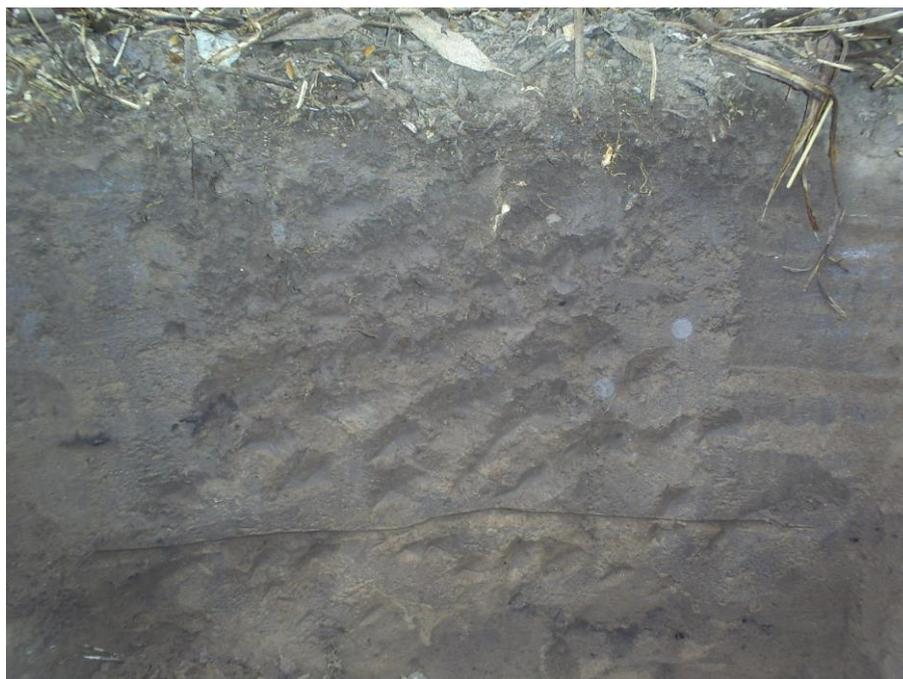


Foto 3.3. Perfil de la situación con mínimo disturbio (ND).

Teniendo en cuenta todos los perfiles culturales descriptos se puede indicar que H1 correspondió a la capa superficial, de unos pocos centímetros de espesor, caracterizada por un alto grado de pulverización estructural, indicada como tierra suelta. H6 y H8 correspondieron a capas densificadas, comúnmente denominadas "piso de rastra" y "piso de arado" respectivamente, por corresponder a las profundidades normales de trabajo de dichos

implementos. El subhorizonte H7 fue el sector donde se evidenció el efecto de la labor de descompactación con reja cero teniendo la particularidad de que se encontraron grandes agregados pertenecientes a la capa H₈ que seguramente permanecieron porque la herramienta no logró fragmentar totalmente esta capa compactada (Figuras 3.1 y 3.2. y fotos 3.1 y 3.2.). En este sentido, Ferreras *et al.* (2001), evaluaron el perfil cultural resultante de sistemas de labranza vertical y siembra directa, pudiendo identificar que bajo siembra directa la proporción de sectores masivos y terrones soldados, sin porosidad interna, con caras de ruptura lisas y de cohesión elevada, fue del 64%, mientras que en el perfil bajo labranza vertical estos sectores representaron el 41% y se encontraron por debajo de la zona afectada por la labor.

De la comparación entre los perfiles culturales actual y del año 2002, correspondientes a los tratamientos de siembra directa sin descompactación subsuperficial (SS) y de siembra directa (SD), respectivamente, se evidencia un incremento en el espesor de la capa compactada (H₈), lo que podría deberse al efecto de la no remoción con tránsito continuo de equipo agrícolas que se utilizaron en los sucesivos años posteriores a la evaluación del año 2002, similar a lo planteado por Jorajuría *et al.* (1996) quienes indicaron que esta compactación podría ser el resultado del efecto aditivo del pasaje de implementos y de la compactación inducida por el tráfico de tractores, mientras que McKyes (1985) sostiene que el ancho y la profundidad del suelo compactado se incrementan con el número de pasadas de tránsito agrícola. En este sentido la disminución del espesor de H₁ y el correspondiente ascenso en término de profundidad del H₆ también podrían corresponderse a éstas causas.

Teniendo en cuenta que para cada tratamiento, las capas del perfil cultural variaron, para que fueran comparables los valores de las variables medidas en ellas al realizarse los análisis estadísticos y teniendo en cuenta que las capas fueron 3 en todos los casos, desde ahora en adelante se nombraran como:

P1: Profundidad 1.

P2: Profundidad 2.

P3: Profundidad 3.

3.2. Peso específico aparente

3.2.1. Evolución del peso específico aparente (PEA)

Para el análisis de la evolución del PEA a través de tiempo, se comparan sólo los tratamientos de siembra directa sin ninguna remoción, SS y SD, del 2009 y 2002 respectivamente. Se utiliza la situación ND como condición original de dicha evolución.

En la tabla 3.4 se comparan los valores de PEA promedio de todas las capas del perfil cultural correspondientes al año 2009 con los valores obtenidos en 2002 y con los de la situación con mínimo disturbio (ND).

SITUACIÓN	PEA PROMEDIO g/cm ³	
ND (0 – 28 cm)	1,15	B
2009 (0 – 30 cm)	1,20	B
2002 (0 – 27 cm)	1,35	A

Tabla 3.4. Evolución del PEA promedio de todas las capas del perfil cultural. *Letras distintas indican diferencias significativas según el test LSD Fisher.*

Se observa una disminución estadísticamente significativa del PEA con respecto al año 2002. Los valores obtenidos en el año 2009 no se diferenciaron a los de ND, mientras que en el año 2002 los valores de PEA eran significativamente mayores a una situación sin disturbio.

Esto indicaría que al analizarse el PEA como valor promedio entre todas las capas del perfil cultural y sin entrar en el detalle de cada subhorizonte en particular, se encuentra que ésta variable ha sufrido una disminución en el transcurso de 6 años.

En la tabla 3.5 se comparan los valores de PEA de cada subhorizonte y cada tratamiento:

SITUACIÓN	PROFUNDIDAD	PEA g/cm ³	
ND	P1	0,95	B
2009	P1	0,97	B
2002	P1	1,29	A
ND	P2	1,22	B
2009	P2	1,27	AB
2002	P2	1,37	A
ND	P3	1,29	A
2009	P3	1,37	A
2002	P3	1,39	A

Tabla 3.5. Evolución del PEA para cada capa del perfil cultural de siembra directa.
Letras distintas indican diferencias significativas para cada profundidad según el test LSD Fisher.

En P1 y P2 el PEA disminuyó con respecto al año 2002, y tendió a asemejarse a los valores de la situación no disturbada, siendo significativa la disminución únicamente en P1 de 2009 respecto a la de 2002. Es preciso resaltar que en el año 2002 el PEA en P1 y P2 era significativamente superior al de ND, mientras que en P3, a pesar de que los valores absolutos de PEA tanto para 2002 y 2009 eran mayores que en ND, no hubo diferencia estadísticamente significativa.

Estos resultados coinciden con lo demostrado por Gudelj y Masiero (2000), quienes afirman que la implementación de la siembra directa por un largo periodo tiempo densifica los suelos en los primeros años, pero luego, superficialmente el efecto tiende a revertirse debido probablemente a los incrementos de materia orgánica en esos primeros centímetros y a la actividad biológica que produce la continuidad de este sistema. Aoki *et al.* (2008) encontraron que el carbono orgánico contenido en el suelo y el PEA están inversamente relacionados ($r = -0,78$). Es sabido que en agroecosistemas bajo rotaciones exclusivamente agrícolas, el contenido de carbono del suelo está relacionado con el aporte de carbono de la vegetación (Aoki *et al.*, 2008). Teniendo en cuenta que en este ensayo experimental se realiza una rotación agrícola pura en la que se incluyen cultivos que tienen un elevado aporte de carbono, y además se practica la fertilización lo que aumentaría la producción de biomasa, es muy probable que al menos en P1 se haya producido un aumento de materia orgánica con respecto al año 2002, sobre todo en los primeros centímetros del suelo (Studdert y Echeverría, 2000; Steinbach y Álvarez, 2006). Por su parte, Nardone (1994) explica que se generan poros como consecuencia de la mayor actividad de la fauna edáfica,

del sistema radicular de los cultivos y malezas y la falta de labranzas. Todo esto explicaría esta disminución del PEA en la capa más superficial del perfil cultural. Esto mismo observaron Aparicio y Costa (2007), que luego de 9 años desde la instalación del ensayo, encontraron que el PEA del suelo en SD disminuyó en los 3-8 cm de profundidad e indicaron una tendencia similar en la segunda profundidad de muestreo (13-18cm).

3.2.2. Efecto de la labor de subsolado

La introducción de una labor de subsolado según Elnazif *et al.* (1999) reduce la densidad aparente. En el mismo sentido Meharban *et al.* (1998) encontraron que las labranzas profundas disminuían la densidad aparente y la resistencia mecánica hasta la profundidad de trabajo, a la vez que favorecían el crecimiento radical y la extracción de agua de capas más profundas.

Al comparar los valores promedio de todo el perfil cultural de cada tratamiento, obtenidos a partir de los valores de PEA de cada capa del perfil cultural, no se observaron diferencias significativas pero el PEA tuvo una tendencia a disminuir con la introducción de la labor de subsolado (Tabla 3.6.).

TRATAMIENTO	PEA PROMEDIO g/cm ³	
CS	1,19	A
SS	1,20	A

Tabla 3.6. Efecto del subsolado sobre el PEA promedio de todas las capas del perfil cultural. Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) según el test LSD de Fisher

La práctica de descompactación subsuperficial solo impactó significativamente en la disminución del PEA de P1, en P2 y P3 no se observaron diferencias estadísticamente significativas. En P2 si bien la diferencia no fue significativa, los valores de PEA fueron llamativamente mayores en el tratamiento CS respecto a SS, (Tabla 3.7.).

TRATAMIENTO	PROFUNDIDAD	PEA g/m ³	
CS	P1	0,90	B
SS	P1	0,97	A
CS	P2	1,31	A
SS	P2	1,27	A
CS	P3	1,36	A
SS	P3	1,37	A

Tabla 3.7. Efecto de la labor de subsolado sobre el PEA en cada capa del perfil cultural. Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según el test LSD Fisher. $R^2 = 0,90$, $CV = 5,61$.

Resultados similares fueron encontrados por Introcaso (2008) *et al.* quienes midieron el PEA y el rendimiento de un cultivo de maíz con el efecto del subsolador en siembra directa en un Argiudol típico, observando que el subsolado no tuvo efecto significativo en ninguna de las profundidades estudiadas, y sólo una tendencia a disminuir el PEA

De acuerdo a lo estudiado por Griffith *et al.* (1977) los valores de PEA obtenidos (Tabla 3.4.) no tendrían una magnitud suficiente como para que las raíces puedan ver inhibido su crecimiento, ya que en un suelo franco arcillo limoso esto ocurriría a un PEA de 1,4-1,5 g/cm³, mientras que pueden adecuarse hasta 1,7 g/cm³ en suelos arenosos de bajo contenido de materia orgánica.

En cuanto a la eficiencia de la labor de aflojamiento, Mckyes (1985) sostiene que el efecto de una labor de aflojado dependerá de varios factores, incluyendo la densidad del suelo, el contenido de humedad, la geometría de la herramienta y la velocidad de labor.

Cholaky (2003) señala que cuando la situación de partida a una labor de subsolado es de baja compactación, similar a la del primer horizonte del perfil cultural aquí estudiado, tanto en suelo húmedo como en suelo seco la fragmentación que ocasiona la reja cero es mas eficiente que cuando se parte de una alta compactación. Esto tendría que ver con el efecto positivo que tubo el subsolado sobre el PEA en la capa superficial. Esto se da tanto en suelo seco como en suelo húmedo. La humedad del suelo en el momento en el que se realizó la labor fue de 8,8 % en la capa de 0 – 20 cm y 11,6 % en la capa de 20 – 40 cm. Por su parte Camacho-Tamayo y Rodríguez (2007), evaluaron el desempeño de implementos de labranza a tres contenidos hídricos (5, 12, y 15 %) de un suelo de textura franca y observaron que el contenido de agua intermedio (12 %) se presentó como la condición adecuada para laborear

el suelo generando un menor requerimiento de potencia y baja demanda de energía, con una mayor área de suelo disturbada que las restantes condiciones de humedad.

En cuanto al pobre efecto que tubo el subsolado en la segunda capa del perfil se puede explicar por varios factores, uno de ellos sería que al ser distintos los perfiles culturales de uno y otro tratamiento y por consecuencia la profundidad de muestreo, en el caso particular de la segunda capa, las muestras de PEA (como se indicó en el punto 3.1.) en CS se extrajeron a mayor profundidad que en SS, por este motivo se considera que sería recomendable en estos casos utilizar profundidades arbitrarias de muestreo para que la comparación sea mas sensible. Sumado a esto, mediante una evaluación visual de los perfiles se observó en esta capa una mezcla de horizontes H₅ y H₈, lo que indicaría que la labor no logró fracturar correctamente todo el perfil, posiblemente debido a errores operacionales o en la regulación de la herramienta, ya que el contenido hídrico para este horizonte según lo señalado antes era el adecuado. Otro factor que tiene que ver con este resultado es el momento en el que se realizó el muestreo teniendo en cuenta que la bibliografía documenta reconsolidaciones del suelo producidas a los 27 días luego de la labor (Sojka *et al.*, 1990), no antes de los 5 meses (Carter, 1988), al año (Busscher *et al.*, 1986) o a los tres años (Carter *et al.*, 1996), y que las muestras se extrajeron en el mes de febrero de 2009, es decir 6 meses después de realizada la labor. Los mecanismos de la reconsolidación no son claros. En ellos participan las variaciones en el contenido de humedad del suelo al momento de realizar el subsolado, las operaciones de labranza secundaria (Unger, 1993), los ciclos de humedecimiento - secado, congelamiento - deshielo (Dexter, 1991, Carter *et al.*, 1996) y la actividad biológica (Cassel y Nelson, 1985). Barber (1994) sostiene que cuando las precipitaciones ingresan al perfil, disgregan los terrones débilmente estructurados, promoviendo un rearreglo y empaquetamiento cerrado de las partículas, conformando nuevamente una matriz densa.

Cabe mencionar que estos resultados no reflejan lo observado subjetivamente, ya que en CS la proliferación y disposición en el espacio de las raíces (foto 3.4) del cultivo de maíz indicaban un aflojamiento del perfil en la parcela tratada con labor de descompactación subsuperficial en relación a SS. Por lo tanto se podría inferir que el PEA no sería una variable lo suficientemente sensible para realizar este tipo de comparaciones. Si bien algunos autores citan a la resistencia mecánica como más sensible que el PEA para detectar efectos de labranzas (Bauder y Black, 1981; Hammel, 1989). En igual sentido, Gamuzina (2008) afirma que la resistencia mecánica es una variable más sensible al efecto del tránsito agrícola que el PEA e indica que es factible utilizarla como indicadora de la compactación del suelo. En cambio, Vepraskas (1988) considera al PEA como una medición más estable que la resistencia a la penetración, ya que es menos afectada por el contenido de agua del perfil.



Foto 3.4. Efecto del subsolado sobre el enraizamiento del cultivo. *Izquierda: raíces verticales en tratamiento siembra directa con labor profunda de descompactación (CS). Derecha: raíces horizontales en tratamiento siembra directa sin labor profunda de descompactación (SS).*

3.3. Compactación máxima.

En la figura 3.3 se aprecian las curvas obtenidas a través del Test Proctor en las que se relaciona el PEA_{max} con el contenido hídrico del suelo. Se graficaron las curvas correspondientes a la capa superficial de cada tratamiento y de la situación con mínimo disturbio para las tres profundidades.

La profundidad 1 de ND presentó el menor PEA_{max} a un contenido hídrico superior al de las demás situaciones. Es de resaltar, además, que la tasa de aumento de PEA por cada aumento de la humedad fue marcadamente inferior respecto a las otras curvas. El extremo contrario a esto se dio en la tercera profundidad de la situación no disturbada. El resto de las situaciones, como era de esperar, presentaron una tendencia similar entre ellas, salvo la situación SD SS del BII que se encuentra desfasada con respecto a las restantes situaciones bajo siembra directa. Esta misma distribución fue encontrada por Quiroga *et al.* (1999) quienes analizaron el comportamiento del PEA en relación a la humedad edáfica utilizando el test Proctor para tres usos: cultivo sin rotación, cultivo con rotación y suelo virgen, donde se visualizó que, al igual que para éste trabajo, la situación de suelo virgen presentó el menor valor de PEA_{max} a mayores contenidos hídricos del suelo respecto a los demás usos, la situación bajo cultivo sin rotación presentó el mayor valor de PEA_{max} con menor contenido hídrico del suelo en relación a los demás, y la situación bajo rotación mostró valores intermedios de estos parámetros.

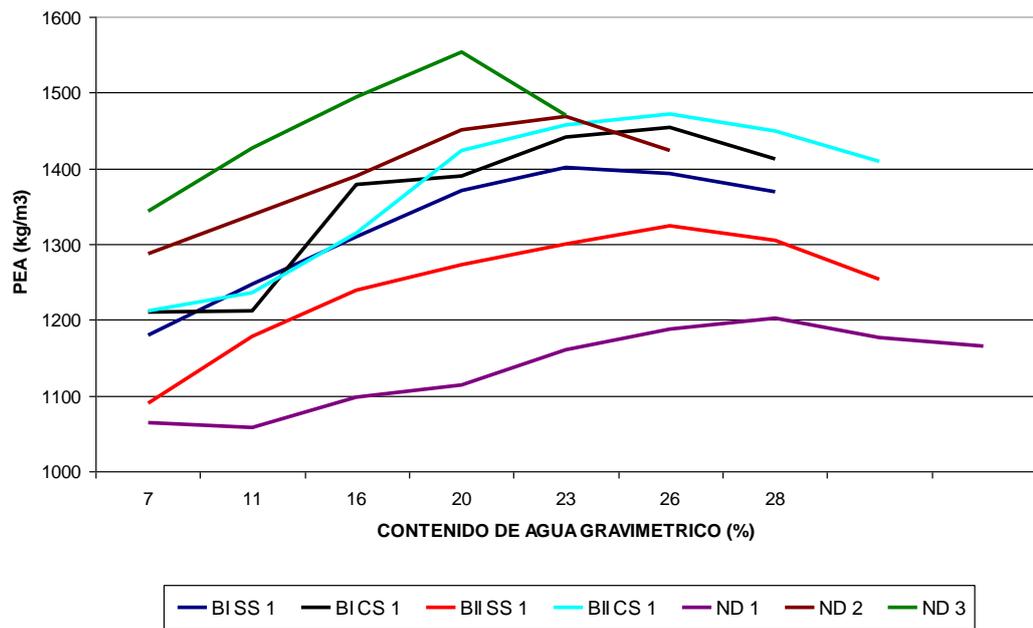


Figura 3.3. Curvas de PEA y contenido hídrico. *BI SS 1: bloque I, sin subsolado, profundidad 1; BI CS 1: bloque I, con subsolado, profundidad 1; BII SS 1: bloque II, sin subsolado, profundidad 1; BII CS 1: bloque II, con subsolado, profundidad 1; ND 1: situación no disturbada, profundidad 1; ND 2: situación no disturbada, profundidad 2; ND 3: situación no disturbada, profundidad 3.*

Al analizar la evolución de la compactación máxima, sin tener en cuenta la labor profunda de descompactación se observa que en P1 el PEA_{max} descendió $0,16 \text{ g/cm}^3$ en el período 2002 – 2009, en cambio el contenido hídrico en el cual se llega al PEA_{max} ($HPEA_{max}$) aumento un 3 % en ese mismo período. Teniendo en cuenta el PEA_{max} de la situación ND, se puede afirmar que en este período el PEA_{max} tendió a acercarse al de ND. En SD el PEA_{max} fue $0,23$ y $0,11 \text{ g/cm}^3$ más alto para P2 y P3, respectivamente que los de las mismas profundidades de ND, y el aumento del $HPEA_{max}$ es de $6,73$ y $3,02$ %, respectivamente (tabla 3.8). También se puede observar en la tabla 3.8. la relación inversa entre PEA_{max} y el $HPEA_{max}$, en el sentido de que a medida que disminuye el PEA_{max} , aumenta el contenido de agua al que se alcanza el mismo.

Profundidad	SD 2009		SD 2002		ND	
	PEA _{max} g/cm ³	HPEA _{max} %	PEA _{max} g/cm ³	HPEA _{max} %	PEA _{max} g/cm ³	HPEA _{max} %
1	1,40	24,60	1,56	21,00	1,20	34,87
2	1,70	18,00	1,70	18,00	1,47	24,73
3	1,66	17,50	1,66	17,50	1,55	20,52

Tabla 3.8. Evolución de la compactación máxima (PEA_{max}) y contenido hídrico del suelo en el cual se alcanza la máxima compactación (HPEA_{max}).

Estos resultados podrían estar asociados con la pérdida de carbono orgánico que Parra (2004) encontró que fue del orden del 50 % entre la situación bajo siembra directa y una situación de mínima alteración. La implicancia de esta pérdida sería la modificación de la relación esqueleto: plasma orgánico lo que conlleva a cambios en la separación entre las partículas, fundamentalmente esqueléticas, como así también a la forma de movimiento de unas con respecto a las otras, siendo esto último limitado por la fricción partícula a partícula y por las uniones interpartículas (Bradford *et al.*, 1971). Thomas (1996) y Ferreas *et al.* (1998), encontraron una importante relación entre el PEA_{max} y el carbono orgánico.

Quiroga *et al.* (1999) trabajando en 52 horizontes Ap de Haplustoles, encontraron que por cada 5 g/kg de suelo de aumento de materia orgánica, el PEA_{max} disminuye 0,06 g/cm³. Parra (2004) para obtener la misma disminución de PEA_{max} necesitó un incremento de 8,6 g/kg de materia orgánica.

Otro factor a analizar en lo que respecta al PEA_{max}, es la humedad a la que se alcanzó el mismo, dependiendo esta de la textura y del contenido de materia orgánica (Diaz-Zorita y Grosso, 2000). Debido a que la textura es la misma para todos los tratamientos, se atribuyen las diferencias a los contenidos de carbono orgánico total.

Quiroga *et al.* (1999) trabajando con Haplustoles, encontraron que los PEA_{max} de los suelos vírgenes fueron menores y llegaron a un PEA_{max} con un mayor contenido de humedad que los cultivados.

3.4. Compactación relativa.

Como se indicó anteriormente, en el punto 2.4.4, esta variable de síntesis se calculó de dos maneras diferentes utilizando una u otra de acuerdo a la sensibilidad que naturalmente muestra cada una de ellas para evidenciar diferencias a la hora de realizar una comparación. En el caso de la ecuación de Carter (1990), para este estudio en particular arroja resultados

comparables solamente cuando el PEA_{max} es similar entre los tratamientos comparados. Se la utilizó para evaluar el efecto que la labor de subsolado provocó en el suelo luego de haber sometido a este a 14 años de SD. Pero esta ecuación no arrojaría un resultado coherente cuando se busca comparar dos o mas situaciones en donde varía considerablemente el PEA_{max} , como cuando se quiere comparar una situación bajo SD y ND y a su vez dentro de SD comparar años diferentes. Para esto la ecuación de Campbell (1996), aunque coloca en un peor nivel a los tratamientos que tengan un PEA_{max} mas bajo ya que es más fácil que su valor de PEA actual esté mas próximo a éste, relativiza a todos los tratamientos a una situación ND en términos del fenómeno de compactación, y además se la podría utilizar para estimar el mejoramiento o deterioro de una situación a través de los años.

Como se aprecia en la tabla 3.9. la CR según Campbell (1996) en P1 y P2 descendió en el período 2002-2009, pero sin significancia estadística, en cambio en P3 se mantuvo sin variación. Si bien los descensos de esta variable fueron evidentes, no fueron estadísticamente significativos debido a la alta variabilidad que presentaron los datos al ser calculado este índice ($CV = 32.98$).

AÑO	PROFUNDIDAD	CR %	
2002	P1	55,68	A
2009	P1	25,51	A
2002	P2	33,67	A
2009	P2	8,47	A
2002	P3	21,65	A
2009	P3	22,25	A

Tabla 3.9. Evolución de la compactación relativa (CR) según Cambell en cada capa del perfil cultural. *Letras distintas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$), según el test LSD Fisher. $R^2 = 0,95$, $CV = 32,98$.*

En la tabla 3.10. se observa que la labor de subsolado tampoco tuvo efecto significativo sobre la CR según Carter (1990). Solamente una ligera tendencia a disminuir en CS en las profundidades 1 y 3. Esto se debe a los mismos factores que explican el PEA_{act} (punto 3.2.2.), ya que en este caso es la única variable que influye sobre esta ecuación debido a que el PEA_{max} de cada subhorizonte es igual para ambos tratamientos.

TRATAMIENTO	PROFUNDIDAD	CR %	
CS	P1	63,87	A
SS	P1	69,04	A
CS	P2	74,89	A
SS	P2	72,50	A
CS	P3	81,89	A
SS	P3	82,39	A

Tabla 3.10. Efecto del subsolado sobre la compactación relativa (CR) según Carter.
Letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$) según el test LSD Fisher. $R^2 = 0,73$, $CV = 6,26$.

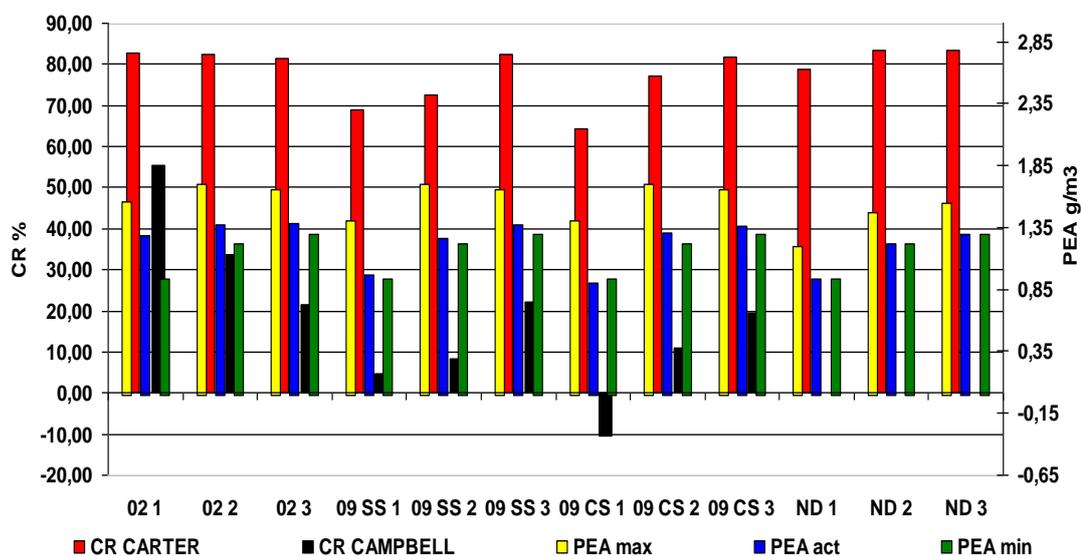


Figura 3.4. CR y sus componentes según Carter y Cambel. *Todas las situaciones salvo ND son bajo siembra directa. 02 1: año 2002, profundidad 1; 02 2: año 2002, profundidad 2; 02 3: año 2002, profundidad 3; 09 1: año 2009, profundidad 1; 09 2: año 2009, profundidad 2; 09 3: año 2009, profundidad 3; ND 1: situación no disturbada, profundidad 1; ND 2: situación no disturbada, profundidad 2; ND 3: situación no disturbada, profundidad 3.*

En la figura 3.4. se representó la CR según Carter y Campbell y sus componentes para cada situación, es decir PEA_{max} , PEA_{act} y PEA_{min} . Aquí se puede observar que el patrón de distribución de los valores de CR para cada profundidad tanto para Carter como para Campbell ha cambiado con respecto al año 2002 y a la situación ND. En el primer caso (CR

según Carter) se ha acentuado más la diferencia entre subhorizontes aumentando a medida que crece la profundidad y tanto en P1 como en P2 se ha registrado una disminución notoria aún teniendo en cuenta que el PEA_{max} descendió, pero también lo hizo en mayor proporción el PEA_{act} .

En cuanto a la CR según Campbell, en 2009 cambió su patrón de distribución de los valores de CR en cada profundidad, respecto al año 2002 para asemejarse a la situación ND. A diferencia del año 2002 los valores van creciendo a medida que aumenta la profundidad y estos son notablemente menores, esto último quiere decir que ha habido un mejoramiento, aunque no estadísticamente significativo, de este indicador de la calidad física del suelo.

Analizando el efecto del subsolado mediante estas variables, ambas ecuaciones arrojan una tendencia similar para los dos tratamientos y obedecen a lo discutido cuando se analizó el efecto de esta labor mediante el PEA_{act} . En el tratamiento CS en P1 del año 2009 se observa que la CR (Campbell) fue negativa ya que el PEA_{act} fue menor al PEA_{min} . En la situación ND se observa que la CR (Campbell) es igual a cero, debido a que el PEA_{act} y el PEA_{min} son iguales, por lo tanto esto indicaría la situación de referencia, es decir la magnitud ideal de PEA que puede tener este indicador para este suelo.

Capítulo 4.

CONCLUSIONES

Para las condiciones de suelo, clima, cultivo y manejo del sitio bajo estudio, las conclusiones son las siguientes:

- La implementación de un sistema de labranza sin remoción del suelo como lo es la siembra directa, trae aparejado una disminución del PEA en superficie, mientras que en las capas subsuperficiales del perfil esta variable se mantiene constante a lo largo del tiempo de ensayo.
- Al transcurrir 6 meses de realizada la labor de descompactación, el efecto de la misma sobre la variable estudiada, solo perdura en la capa superficial del suelo.
- La compactación máxima del horizonte superficial del suelo sometido a siembra directa disminuye con el correr de los años.
- La compactación relativa a una situación no disturbada de todo el perfil cultural sometido a siembra directa durante 14 años tiende a disminuir con el correr de los años. Esto indicaría un mejoramiento de la calidad física de este suelo hablando en términos de compactación.
- La compactación relativa de un suelo manejado con siembra directa durante 14 años, no disminuye significativamente en ninguno de los subhorizontes del perfil cultural al introducir una labor de descompactación profunda.

Capítulo 5.

BIBLIOGRAFIA

AOKI, A.M., P. CAMPITELLI, O. GUDELJ, C.I. VETORELLO, G. ESMORIZ y R. SERENO 2008 Efectos de diferentes sistemas de cultivos y labranzas sobre propiedades indicadoras de calidad de suelo. **XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. San Luis, Argentina.

APARCIO, V. y COSTA, J.L. 2007 Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. **Soil Till. Res.** (1-2): 155-165.

ARAGÓN, A., M.G. GARCIA, R.R. FILGUEIRA and Y.A. PACHWPSKY 2000 Maximum compactability of argentine soils from proctor test. The relationship with organic carbon y water content. **Soil till. Res.** 56: 197 – 204.

BARBER, R.G. 1994 Persistence of loosened Horizons and Soybean Yield Increases in Bolivia. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 58:943-950.

BAUDER, A., A.L. BLACK 1981 Soil carbon, nitrogen, and bulk density comparisons in two cropland tillage systems after 25 years and in virgin grassland. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45:1166-1170.

BECERRA, V. 1999 **Plan Director. ADESUR** (Asociación Interinstitucional para el Desarrollo del sur de Córdoba). Dpto. de prensa y publicaciones. Universidad Nacional de Río Cuarto. 51-68.

BECKER, A.R., M.P. CANTÚ, H.F. SCHIAVO y J.I. OSANA 2001 Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica en la región pedemontana del suroeste de Córdoba, Argentina. **XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo**. CD. Trabajo VII 41-44.

BECKER, A. 2006. Evaluación del proceso de Degradación de Suelos por erosión Hídrica en una subcuenca representativa del Suroeste de la Provincia de Córdoba, Argentina. **Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Río Cuarto**.

BLAKE, G.R. and K.H. HARTGE 1986 Bulk density. Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods. **Agronomy monograph no 9**. Second edition. Pp. 363 -376.

BOTTA, G., J. RESSIA, H. ROSSATO, M. TOURN, E. SOZA, C. FERRERO y S. STADLER 2005 Efecto de la labranza vertical sobre el suelo y el rendimiento del cultivo de Girasol (*Helianthus annus L.*). **Agro-Ciencia** 0716 – 1689

BRADFORD, J.M., E.L. SKIDMORE y J.G. LARSON 1971 Effect of soil overburden pressure on penetration of fine metal probes. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 11: 73-78

BRICCHI, E. 1996 **Relaciones entre la compactación, morfología y propiedades físicas en un Hapludol típico de Río Cuarto**. Tesis de Magister Scientiae en Ciencias del Suelo. Escuela para graduados de la Facultad de Agronomía de la U.B.A. Buenos Aires. Argentina.

BUSCHIAZZO D.E., J.L. PANIGATTI Y F.J. BABINEC 1996 Labranzas en la región semiárida argentina. **Extra**, Santa Rosa (LP), pp. 126.

BUSSCHER W.J., R.E. SOJKA Y C.W. DOTY 1986 Residual effects of tillage on Coastal Plain soil strength. **Soil Sci.** 141: 144-148.

CACCIAVILLANI, M. 2005 **Evolución del comportamiento físico de un suelo Haplustol típico de Córdoba bajo dos sistemas de laboreo**. Preproyecto de Trabajo Final Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.

CAMACHO – TAMAYO, J.H. y G.A. RODRIGUEZ 2007 Evaluación de implementos de labranza a diferentes velocidades de operación y contenidos de agua del suelo. **Agric. Téc.** (Chile) 67: 60 – 67.

CAMPBELL, D. J. 1994 Determination and use of soil bulk density in relation to soil compaction. **En:** Soane B.D., van Ouwerkerk C. (Eds.) **Soil compaction in crop production**. Elsevier.

CANTERO, A., E. BRICCHI, V. BECERRA, J. CISNEROS y H. GIL 1984 Zonificación y descripción de las tierras del Dpto. Río Cuarto. Talleres gráficos de la UNRC, **adhesión del bicentenario de la fundación de la ciudad de Río Cuarto**.

CANTÚ, M.P. 1992 Holoceno de la Provincia de Córdoba. Manual: Holoceno de la Republica Argentina. Tomo I. Ed. Doctor Martín Iriondo. **Simposio Internacional sobre el holoceno en América del sur**. Paraná, Argentina.

CARTER, M.R. 1988 Penetration resistance to characterize the depth and persistence of soil loosening in tillage studies. *Can. J. of Soil Sc.* Vol. 68 (4): 657-668.

CARTER, M.R. 1990 Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage Studies. *Can. J. Soil Sci.* 70:425-433.

CARTER, M.R., D.A. HOLMSTROM., L.M. COCHRANE, P.C. BRENTON, J.A. ROESTEL VAN, D.R. LANGILLE, y W.G. THOMAS 1996 Persistence of deep loosening of naturally compacted subsoils in Novo Scotia. *Can. J. Soil Sci.* 76:541-547.

CASSEL, D.K. y L.A. NELSON 1985 Spatial and temporal variability of soil physical properties of Norfolk loamy sand as affected by tillage. **Soil and Till. Res.** vol. 5: 5-17.

CHOLAKY, C. 2003 **Efectividad y persistencia de una labor de descompactación con subsolador alado, en función de la compactación y humedad**

antecedentes. Tesis magíster scientiae en manejo y recuperación de tierras. Universidad Nacional de Río Cuarto. Facultad de Agronomía y Veterinaria, Río Cuarto, Argentina.

CISNEROS, J.M., C. CHOLAKY, E. BRICCHI, O. GIAYETO y J.J. CANTERO 1996 Evaluación del efecto del uso agrícola sobre las propiedades físicas de un Haplustol típico del centro de Córdoba. **XV Congreso de la Ciencia del Suelo**: 23-24. Sta. Rosa, La Pampa, Argentina.

CISNEROS, J.M., A. CANTERO, G.J. MARCOS, A. DEGIOANNI, E. BRICCHI, O. GIAYETTO, C. CHOLAKY, E. BONADEO, G. CERIONI y M. UBERTO 1998 Comportamiento de un subsolador alado, adaptable a implementos de uso común. **En**: Balbuena, R. H., Benez, S. H. y D. Jorajuría (Eds.) **Ingeniería Rural y Mecanización Agrícola en el ámbito Latinoamericano**:128-136. Editorial de la UNLP, Argentina.

CLARK R.L., RADCLIFFE D.E., LANGDALE G.W. y R.R. BRUCE 1993 Soil strength and water infiltration as affected by paratillage frequency. **American Soc. of Agric. Engineers**, Vol.36 (5): 1301-1305.

DEGIOANNI, A.J. 1998 **Organización territorial de la producción agraria en la región de Río Cuarto (Argentina)**. Tesis Doctoral, Universidad de Alcalá de Henares. Departamento de geografía. Alcalá de Henares, España.

DEXTER, A.R. 1991 Amelioration of soil by natural processes. **Soil and tillage Research**, 20: 87-100.

DÍAZ-ROSSELLO, R. 2005 Desafíos de la intensificación agrícola en el cono sur. **In Seminario Internacional Indicadores de Calidad de Suelos**. M. Juárez, Córdoba, INTA-PROCISUR. Trabajos en CD.

DIAZ-ZORITA, M. y G.A. GROSSO 2000 Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean Pampas. **Soil an Tillage Resech** 54: 121-126.

DIAZ-ZORITA, M. y C.O. ALVAREZ 2006 Compactabilidad de molisoles evaluada "in situ" o con muestras disturbadas. **XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. Salta, Argentina.

ELISSONDO, E., J.L. COSTA, E. SUERO, K.P. FABRIZZI y F. GARCIA 2001 Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. **Ciencia del suelo** 19N1:11-19.

ELNAZIF, S.A., LUO XIWEN, LUO XW 1999 The effect of different tillage management and working depth on maize production. **Journal of South China Agricultural University**, 20(2): 85-90.

FERRERAS, L., J.J. DE BATISTA, A. AUSILIO y C. PECORARI 1998 Efecto de dos sistemas de labranza sobre las propiedades físicas de un Argiudol típico. **XVI Congreso Argentino de la ciencia del suelo**: 23-24. Villa Carlos Paz, Córdoba, Argentina.

FERRERAS L.A., J. J. DE BATTISTA, A. AUSILIO y C. PECORARI 2001 Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. **Pesq. Agropec. Bras.** 36 (1): 161-170.

FERRERAS, L., G. MAGRA, P. BESSON, E. KOVALEVSKY y F. GARCÍA 2007 Indicadores de calidad física en suelos de la región pampeana norte de Argentina bajo siembra directa. **Ciencia del Suelo**, 25(2):159-172.

GAUTRONNEAU, Y. y H. MANICHON 1987 Guide methodologique du profil cultural. **Cerefgeara**, 71 pp.

GLAMUZINA, J.J. 2008 **Evaluación de la compactación edáfica causada por el tránsito bajo siembra directa en función del contenido hídrico**. Trabajo Final presentado para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Fac. de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

GUDELJ, O. y B. MASIERO 2000 Efectos de manejo del suelo sobre su densidad aparente. **XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.

GREENLAND, D. 1981 Soil Management and degradation. **Soil Sci.** 32:301-322.

GRIFFITH, D.R., J.V. MANNERING y W.C. MOLDENHAUER 1977 Conservation tillage in the Eastern Corn Belt. **Journal of soil and Water Conservation**, 32:20-28.

HAKANSSON, I. y R.C. REEDER 1994 Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. **Soil & Tillage Research**, 29:277-304.

HAMMEL, J.E. 1989 Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in Northern Idaho. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 53:1515-1519.

HOWARD, R.F., M.J. SINGER y G.A. FRANTZZ 1981 Effects of soil properties, water content, and compactive effort on the compaction of selected California forest and range soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 45(2): 231-236

INDELANGELO, N., E. BEHR y R. DE CARLI 2008 Efecto del tránsito en un molisol con alto contenido de humedad en el rendimiento del cultivo de trigo. **XXI Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo**. San Luis, Argentina.

INFOSTAT 2008 **Software Estadístico - Manual del Usuario - Grupo Infostat**. Editorial Brujas Córdoba, Argentina.

INTROCASO, R.M., J.M. GUECAIMBURU, J.L. TORELLA, E.C. FAITA, E. WASINGER y C.B. IRURTIA 2008 Acción de la descompactación en siembra directa sobre indicadores físicos del suelo. **XXI Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo**. San Luís, Argentina.

JORAJURÍA, D., L. DRAGHI, y A. ARAGÓN 1996 Compactación del suelo bajo tráfico repetido. **Rev. de Invest. Agraria**, UNLP, 10 (3): 473-482.

KLUTE, A. 1986 Methods of soil análisis. (Ed.) **Agronomy Am. Soc. Of Agronomy**, Inc. Soil Sci. Soc. Of Am Inc. Madison, Wisconsin, USA.

MAHBOUBI, A., A. LAL y N. FAUSSEY 1993 Twenty-Eighth years of tillage effects on two soils in Ohio. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 57: 506-512.

MANSO M. L., H. FORJAN, G.A. STUDDERT, M. ZAMORA y R. BERGH 2008 **Evolución de variables físicas bajo dos sistemas de labranza. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. San Luís, Argentina.

MCKYES E. 1985 Soil Cutting and Tillage. **Developments in Agricultural Engineering** 7. Chapters 3 y 4, págs. 87-104. Elsevier Sc. Publishers B.V. The Netherland.

MEHARBAN, S., M.R. CHAUDHARY and M. SINGH 1998 Effect of deep tillage on growth and yield of maize under water stressed condition at different physiological stages on coarse textures soils. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, 46 (4): 557-562.

MIACZYNSKI, C.R.O. y J. TSSCHAPEK 1965. Los suelos de estepa de la región pampeana. **Revista de investigación Agrícola**. Serie 3, Vol.2 (3).

MICHELENA, R., C. IRURTIA, E. RIVERO, E. RORIG y M. RORIG 2002 Evaluación física de un Haplustol  ntico con siembra directa en la provincia de Córdoba. **XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. Puerto Madryn, Chubut, Argentina.

MICUCCI, F., C. ÁLVAREZ, C. BUSTINGORRI y M.A. TABOADA 2006 Estimación de la compactabilidad de los suelos pampeanos a partir de variables de fácil determinación. **XX Cong. Arg. Ciencia del Suelo**. Salta, Salta, Argentina.

MORENO, I., C. CHOLAKY, M. LESSER y J. MARCOS 1996 Efecto de la labranza sobre el contenido orgánico y su implicancia en la estabilidad estructural. **XV Congreso argentino de la Ciencia del Suelo**. Sta. Rosa, La Pampa, Argentina.

NARDONE, M. 1994 La Siembra directa en la agricultura sostenible. INTA-PAC. **Encuentro de profesionales hacia una agricultura sostenible**. Rosario, 5-6 de octubre. Pp 29-33.

NHANTUMBO, A.B.J.C. and A.H. CAMBULE. 2006 Bulk density by Proctor test as a function of texture for agricultural soils in Maputo province of Mozambique. **Soil and Tillage Research**, 87(2): 231-239

PACKER, I., G. HAMILTON y T. KOEN 1992 Runoff, soil loss and soil physical property changes of light textured soils from long term tillage treatments. **Amj. Soil Res.** 30:789-806.

PARRA, B.J. 2004 **Efecto de distintas intervenciones tecnológicas sobre indicadores de la calidad física de un Hapludol típico.** Trabajo final presentado para optar al grado de Ingeniero Agrónomo. Fac. De Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional de Río Cuarto, Río Cuarto, Córdoba, Argentina.

PARRA, B.J., A.R. BECKER y M.P. CANTU 2008 Evaluación de la compactación de Haplustoles del Área de General Deheza. **XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.** San Luís, Argentina.

QUIROGA, A.R., D.E. BUSCHIAZZO y N. PEINEMANN 1999 Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. **Soil and Tillage Research**, 52(1-2): 21-28.

RANGEON, N.I., L.M. ACIAR, R. OSINAGA, J.L. ARZENO y C. SANCHEZ 2008 Análisis de la resistencia a la penetración y humedad del suelo como indicadores de calidad en distintos sistemas de labranzas. **XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.** San Luís, Argentina.

RESSIA, J.M., L. LAZARO, G.O. MENDIVIL, G.F. BOTTA, M.A. AGOSTINI, M.C. de PABLO y R.H. BALBUENA 1998 Evaluación de diferentes alternativas para la descompactación de suelos. **Congreso Argentino de Ingeniería Rural.**

RHOTON, F.E. 2000 Influence of time on soil response to no-till practices. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 64, 700–709.

ROLLAN, A., M.S. KARLIN y O.A. BACHMEIER 2004 Siembra directa y densificación subsuperficial en molisoles del centro norte de Córdoba. **XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.** Paraná, Entre Ríos, Argentina.

SAGyP y CFA 1995 El deterioro de las tierras en la Republica Argentina. Alerta amarillo. **DUO/Comunicación visual y SVN** 987-95327-3-2.

SANCHEZ-GIRON RENEDO, V. 1996 Dinámica y mecánica de suelos. Ed.: **Aerotécnicas**, Madrid, España.

SASAL, M.C., A. ANDRIULO, S. PORTELA, M.L. DARDER, F. RIMATORI, A. IRIZAR y S. RESTOVICH 2006 Propiedades físicas superficiales de un Argiudol típico bajo dos historias agrícolas contrastantes. **XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.** Salta, Argentina.

SOANE, B. y C. VAN OUWERKERK (Ed) 1994 **Soil compaction in crop production**. Elsevier, Amsterdam.

SOJKA, R.E., W.J. BUSSCHER, D.T. GOODEN y W.H. MORRISON 1990 Subsoiling for sunflower production in the Southeast Coastal Plains. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 54: 1107-1112.

STENINBACH, H.S. y R. ALVAREZ 2006 Cambios en las propiedades físicas de los suelos pampeanos por la adopción de la siembra directa. **XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo**. Salta, Argentina.

STUDDERT, G.A. y H.E. ECHEVERRIA 2000. Crop rotation and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 64:1496-1503.

THOMAS, G.W., G.R. HASZLER y R.L. BLEVINS 1996 The effect of organic matter and tillage on maximum compability of soil using the proctor test. **Soil Science** vol. 161, 8:502-508.

ZHAO, Y., M. KRZIC, C.E. BULMER, and M.G. SCHMIDT 2008 Maximum bulk density of British Columbia forest soils from the Proctor test: Relationships with selected physical and chemical properties. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 72:442-452.

ZHANG, H., K.H. HARTGE and H. RINGE 1997 Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 61(1): 239-245.

UNGER, P.W. 1993 Reconsolidation of Torreritic Paleustoll after tillage with paratill. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 57: 195-199.

VEPRASKAS, M.J. 1988 Bulk density values diagnostic of restricted root growth in coarse-textured soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 52: 1117-1121.

ANEXO



Foto 1. Cobertura superficial en el tratamiento SS.



Foto 2. Raíces creciendo en forma horizontal sobre el subhorizonte H₆ en tratamiento SS.



Foto 3. Estructura del subhorizonte H₅ en el tratamiento CS.



Foto 4. Estructura subhorizonte H₈ en el tratamiento SS.



Foto 5. Estructura de la capa de 0 – 6 cm en la situación ND.



Foto 6. Estructura de la capa de 6 – 28 cm en la situación ND.



Foto 7. Estructura de la capa de 28 - + cm en la situación ND.



Foto 8. Condición superficial en la situación ND.

