

**PROPIEDADES FÍSICAS Y BIOQUÍMICAS DE UN MOLISOL DE TRES ARROYOS  
BAJO AGRICULTURA CONTINUA CON DOS SISTEMAS DE LABRANZA**

**Ing. Agr. Marina Lucrecia Manso**

Trabajo de tesis para ser presentado como requisito parcial para optar al Título de  
***MAGISTER SCIENTIAE EN PRODUCCIÓN VEGETAL***

Área Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales  
PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Balcarce, Argentina

30 de Agosto de 2010

**PROPIEDADES FÍSICAS Y BIOQUÍMICAS DE UN MOLISOL DE TRES ARROYOS  
BAJO AGRICULTURA CONTINUA CON DOS SISTEMAS DE LABRANZA**

**Ing. Agr. Marina Lucrecia Manso**

.....  
**Ing. Agr. Guillermo A. Studdert, M.Sc., Dr. Ing. Agr.**  
**Director de Tesis**

.....  
**Prof. Silvina San Martino, M.Sc., Dr.**  
**Asesora**

**PROPIEDADES FÍSICAS Y BIOQUÍMICAS DE UN MOLISOL DE TRES ARROYOS  
BAJO AGRICULTURA CONTINUA CON DOS SISTEMAS DE LABRANZA**

**Ing. Agr. Marina Lucrecia Manso**

**Aprobada por:**

.....  
**Ing. Agr. Miguel A. Taboada, M.Sc., Dr.**

.....  
**Ing. Agr. Nilda M. Amiotti, Dra.**

.....  
**Ing. Agr. Cecilia Videla, M. Sc., Dra.**

## DEDICATORIA

A Matías, a mis padres y hermanas.

## AGRADECIMIENTOS

- A mi director, Guillermo Studdert, por su gran predisposición y sus invaluables aportes.
- A mi asesora, Silvina San Martino, por sus sugerencias y asesoramiento en estadística.
- A Horacio Forján, por su colaboración, sus consejos y su gran apoyo para llevar a cabo esta tesis.
- A Marcelo y Omar Durandez, por su colaboración en las determinaciones a campo.
- Al personal del Laboratorio de Calidad de la Chacra Experimental de Barrow.
- A Matías, por su compañía y su contención.

## ÍNDICE

	Página
ÍNDICE DE TABLAS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiv
1- INTRODUCCIÓN	1
1.1- Hipótesis de trabajo	7
1.2- Objetivo general	7
1.3- Objetivos particulares	7
2- MATERIALES Y MÉTODOS	8
2.1- Caracterización del sitio experimental	8
2.2- Tratamientos y diseño experimental	9
2.3- Mediciones en suelo	10
2.3.1- Contenido de agua	10
2.3.2- Densidad aparente	10
2.3.3- Resistencia mecánica a la penetración	11
2.3.4- Estabilidad de agregados	11
2.3.5- Carbono orgánico	11
2.3.6- Contenido de nitrógeno de nitrato	12
2.4- Mediciones en el cultivo de maíz	12
2.4.1- Materia seca y concentración de nitrógeno	12
2.4.2- Rendimiento y componentes	12
2.5- Análisis estadístico	13
2.5.1- Datos campaña 2007-2008	13
2.5.2- Comparación con la situación sin disturbar	13
2.5.3- Evolución de las variables edáficas en el tiempo	13
3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
3.1- Mediciones en suelo durante la campaña 2007-2008	14
3.1.1- Contenido de agua	14
3.1.2- Densidad aparente	16
3.1.3- Resistencia mecánica a la penetración	19
3.1.4- Estabilidad de agregados	20
3.1.5- Carbono orgánico	23
3.1.6- Contenido de nitrógeno de nitrato	25
3.2- Mediciones en el cultivo de maíz	28
3.2.1- Condiciones meteorológicas durante el ciclo de cultivo	28
3.2.2- Materia seca aérea	29
3.2.3- Concentración de nitrógeno en planta y en grano	31
3.2.4- Rendimiento y componentes	32
3.2.4.1- Componentes de rendimiento	33
3.2.4.2- Rendimiento	34
3.3- Comparación con la situación sin disturbar	37
3.3.1- Densidad aparente	37
3.3.2- Resistencia mecánica a la penetración	38
3.3.3- Estabilidad de agregados	39

3.3.4- Carbono orgánico	40
3.4- Evolución de las variables edáficas en el tiempo	42
3.4.1- Densidad aparente	42
3.4.2- Resistencia mecánica a la penetración	44
3.4.3- Estabilidad de agregados	46
3.4.4- Carbono orgánico	47
4- CONCLUSIONES	49
5- BIBLIOGRAFÍA	51

**ÍNDICE DE TABLAS**

	Página
Tabla 1- Concentración de nitrógeno en grano para historia agrícola y de pastura bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) sin adición de nitrógeno (0N) y con 70 y 120 kg N ha-1 .....	32
Tabla 2- Número de granos (NG) por unidad de superficie y peso individual de los granos bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) para las dosis 0, 70 y 120 kg N ha-1.	34
Tabla 3- Contenido de agua en los tres años de muestreo de 0-20 cm para historia agrícola y pastura bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). En 1997 se presentan los datos para cada historia previa.	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1-	Precipitaciones y evapotranspiración ocurridas durante la campaña agrícola 2007-2008, y precipitaciones y evapotranspiración histórica durante el período 1938-2008 en Barrow. ....	8
Figura 2-	Temperatura máxima y mínima durante el desarrollo del ensayo (2007-2008) y temperatura máxima y mínima normal en Barrow. ....	9
Figura 3-	Contenido de agua ( $\text{g g}^{-1}$ ) hasta los 60 cm de profundidad previo a la siembra (a) y a la siembra (b) para los tratamientos con historia de pastura y agricultura bajo siembra directa y labranza convencional. ....	14
Figura 4-	Contenido de agua ( $\text{g g}^{-1}$ ) hasta los 60 cm de profundidad en anthesis (a) y madurez fisiológica (b) para los tratamientos con historia de pastura y agricultura bajo siembra directa y labranza convencional. ....	15
Figura 5-	Densidad aparente (DAP) para las historias pastura y agricultura bajo los dos sistemas de labranza, siembra directa y labranza convencional, en los estratos de 3 a 8 cm y de 13 a 18 cm. ....	17
Figura 6-	Resistencia mecánica a la penetración (RMP) hasta los 20 cm de profundidad para labranza convencional y siembra directa. ....	20
Figura 7-	Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP) en los estratos de 0-10 cm y de 10-20 cm de profundidad, según historia previa (pastura y agricultura) y sistema de labranza (siembra directa y labranza convencional). ....	21
Figura 8-	Proporción de agregados luego del tamizado en seco y en húmedo en el estrato de 0-20 cm en las diferentes clases de tamaño de agregados (mm) para las historias de pastura y agricultura bajo labranza convencional y siembra directa. ....	22
Figura 9-	Contenido de COP, COA y COT (COP + COA) para las profundidades 0-5, 5-20 y 0-20 cm para las historias pastura y agricultura y los dos sistemas de labranza (labranza convencional y siembra directa). ....	24
Figura 10-	Relación entre estabilidad estructural, expresada como el cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP), y a) contenido de carbono orgánico total (COT), b) contenido de carbono particulado (COP) y c) contenido de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA) de 0-20 cm bajo siembra directa y labranza convencional provenientes de historia agrícola y de pastura. ....	26
Figura 11-	Contenido de nitrógeno de nitrato a la siembra y en el estadio de 6 hojas de 0-60 cm de profundidad para las dos historias previas bajo labranza convencional y siembra directa. ....	27

Figura 12-	Contenido de nitrógeno de nitrato en madurez fisiológica hasta 60 cm de profundidad para a) historia de pastura y agricultura, y b) bajo labranza convencional y siembra directa en las parcelas sin fertilizar, fertilizadas con 70 y con 120 kg N ha <sup>-1</sup> . .....	28
Figura 13-	Evapotranspiración máxima del cultivo (ETM), precipitaciones (P), déficits y excesos durante el ciclo de maíz en la campaña 2007-2008. ....	29
Figura 14-	Producción de materia seca en el estadio de seis hojas para labranza convencional y siembra directa con historia de agricultura y pastura. ....	30
Figura 15-	Producción de materia seca aérea a madurez fisiológica para las dos historias previas (Agricultura y Pastura), bajo labranza convencional y siembra directa con 0, 70 y 120 kg N ha <sup>-1</sup> . ....	30
Figura 16-	Concentración de nitrógeno en planta en madurez fisiológica para las dosis de 0, 70 y 120 kg N ha <sup>-1</sup> . ....	32
Figura 17-	Rendimientos de maíz (kg ha <sup>-1</sup> ) para las historias previas (pastura y agricultura), bajo los dos sistemas de labranza (siembra directa y labranza convencional) con 0, 70 y 120 kg ha <sup>-1</sup> . ....	35
Figura 18-	Materia seca (MS) de raíces para las dos historias previas (Agricultura y Pastura) bajo labranza convencional y siembra directa (SD) con 0, 70 y 120 kg N ha <sup>-1</sup> . ....	36
Figura 19-	Distribución de raíces de maíz a cosecha en una parcela bajo a) siembra directa y en otra b) bajo labranza convencional en los primeros 30 cm de profundidad. ....	37
Figura 20-	Densidad aparente (DAP) en los estratos 3-8 cm y 13-18 cm para las historias previas Agricultura y Pastura bajo labranza convencional y siembra directa y la situación sin disturbar (Parque). ....	38
Figura 21-	Resistencia mecánica a la penetración (RMP) hasta los 20 cm de profundidad a intervalos de 2,5 cm para a) historia agrícola bajo LC, b) historia agrícola bajo siembra directa, c) historia de pastura bajo labranza convencional y d) historia de pastura bajo siembra directa en comparación con la situación sin disturbar (Parque). ....	39
Figura 22-	Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados en la situación sin disturbar (Parque) y para ambas historias previas (Agricultura y Pastura) bajo labranza convencional y siembra directa en las profundidades 0-10 cm y 10-20 cm. ....	40
Figura 23-	Contenido de carbono orgánico particulado (COP), asociado a la fracción mineral (COA) y total (COT) para las profundidades 0-5, 5-20 y 0-20 cm para la situación sin disturbar y para las historias pastura y agricultura y los dos sistemas de labranza (labranza convencional y siembra directa). ....	41

Figura 24-	Evolución de la densidad aparente (DAP) luego de 10 años de iniciado el ensayo de 3-8 cm para los tratamientos con historia de pastura y agricultura bajo siembra directa y labranza convencional. ....	42
Figura 25-	Evolución de la densidad aparente (DAP) luego de 10 años de iniciado el ensayo de 13-18 cm para los tratamientos con historia de pastura y agricultura bajo siembra directa y labranza convencional. ....	44
Figura 26-	Resistencia mecánica a la penetración (RMP) hasta los 20 cm de profundidad en los 3 años de muestreo (1997, 2002 y 2007) para a) historia agrícola bajo labranza convencional y b) siembra directa y para historia de pastura c) bajo labranza convencional y d) bajo siembra directa. ....	45
Figura 27-	Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP) de 0-20 cm bajo labranza convencional y siembra directa en los años de muestreo 2002 y 2007. ....	46
Figura 28-	Contenido de COT en el estrato de 0-20 cm al inicio del ensayo (1997), luego de 5 años (2002) y a los 10 años (2007) de iniciado para los tratamientos bajo labranza convencional y siembra directa con historia agrícola o de pastura. ....	48

## RESUMEN

El proceso de “agriculturización” se define como el uso creciente y continuo de las tierras para cultivos agrícolas en lugar de usos ganaderos o mixtos. En la región mixta cerealera del centro sur bonaerense se ha incrementado la superficie agrícola asociada a mayor intensidad de uso de los suelos y a una creciente adopción de siembra directa (SD). No obstante, no se cuenta con información acerca del impacto en el mediano-largo plazo de la agricultura continuada con distintos sistemas de labranza sobre las propiedades de estos suelos y sobre el comportamiento de los cultivos. El objetivo de este trabajo fue evaluar el estado de calidad de suelo y su efecto sobre el comportamiento de los cultivos luego de diez años de agricultura continua bajo dos sistemas de labranza habiendo partido de condiciones de manejo previo diferentes. El trabajo se realizó en el partido de Tres Arroyos (38°19'25" S; 60°14'33" W) en un ensayo de larga duración iniciado en 1997 sobre Paleudoles petrocálcicos bajo SD y labranza convencional (LC) con historia previa de pastura y agricultura continua. En 2007 se implantó un cultivo de maíz con distintas dosis de nitrógeno (N), se evaluó producción de materia seca, contenido de N en planta y grano, rendimiento y sus componentes. En suelo se determinaron contenido de agua, densidad aparente (DAP), resistencia mecánica a la penetración (RMP), estabilidad estructural (EE) como cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP), contenido de nitratos (N-NO<sub>3</sub>), carbono orgánico total (COT), asociado a la fracción mineral (COA), y particulado (COP). También se estudiaron las mismas variables edáficas en una situación de suelo sin disturbar y su evolución a través de diez años de agricultura. En el décimo año de ensayo no se hallaron diferencias en DAP ni en las fracciones de carbono orgánico entre los tratamientos evaluados. Bajo SD se registró mayor RMP y EE en subsuperficie respecto a LC (CDMP: 2,44 y 3,17 mm, bajo SD y LC, respectivamente). No se observaron diferencias en rendimiento, contenido de N ni materia seca, así como tampoco respuesta a la fertilización nitrogenada. Las variables edáficas no permitieron explicar el comportamiento del maíz. La principal limitante durante la campaña en estudio fue el déficit hídrico durante la mayor parte del ciclo de cultivo. La condición sin disturbar presentó mayor EE (CDMP:0,55 mm), COP (1,40 g 100g<sup>-1</sup> de 0-20 cm) y RMP respecto a los manejos agrícolas. Con el paso de los años se incrementó la DAP y RMP en subsuperficie, disminuyó la EE, y el COT presentó mayor caída cuando provino de pastura (15,5%), respecto a la historia agrícola (3,2%). En un suelo representativo de Tres Arroyos, la

SD continua no presentó mejores condiciones superficiales respecto a LC, ni aún cuando se aplicó a un suelo con uso agrícola más prolongado.

**Palabras clave:** calidad de suelo, siembra directa, labranza convencional.

## ABSTRACT

### **Physical and biochemical properties of a Mollisol of Tres Arroyos under continuous cropping with two tillage systems**

The process of "agriculturization" is defined as the steady and increasing use of land for continuous cropping rather than for livestock rising or mixed uses. In the south central Buenos Aires province region continuous cropping has increased associated with a growing intensity of land use and of no-tillage (SD). However, no information is available about the impact in the medium to long term continuous cropping with different tillage systems on the properties of these soils and on crop performance. The aim of this study was to assess the soil quality and its effect on crop performance after 10 years under continuous cropping with two tillage systems starting with different initial conditions. The study was conducted at Tres Arroyos (38°19'25"S, 60° 14'33"W) in a long-term experiment on a Petrocalcic Paleudoll under SD and LC with previous management of pasture and continuous cropping. In 2007 corn was planted with different nitrogen (N) rates and its dry matter production, plant N content and grain yield and components, were evaluated. Soil water content, bulk density (DAP), mechanical penetration resistance (RMP), structural stability (EE) measured as the change in mean weight diameter (CDMP), nitrate (NO<sub>3</sub>-N), and total (COT), mineral-associated (COA) and particulate (COP) organic carbon, were determined. Soil variables were compared with an undisturbed situation and its evolution along 10 years of farming. We found no differences in DAP or carbon fractions. Either RMP or EE (CDMP: 2,44 y 3,17 mm, under SD and LC, respectively) were higher under SD. No significant differences in yield and in N and dry matter contents were found. The undisturbed condition showed higher EE (CDMP: 0,55 mm), COP (1,40 g 100g<sup>-1</sup> of 0-20 cm) and RMP than soil management treatments. Either subsurface DAP and RMP increased, and EE and COT decreased along the years. Total organic carbon decrease was higher when previous management had been pasture (15,5%) respect to continuous cropping (3,2%). In a representative soil of Tres Arroyos, SD did not provide better surface conditions respect LC, not even when applied to soil with more prolonged agricultural use.

**Keywords:** soil quality, no tillage, conventional tillage.

## 1- INTRODUCCIÓN

El proceso de “agriculturización” se define como el uso creciente y continuo de las tierras para cultivos agrícolas en lugar de usos ganaderos o mixtos. Este fenómeno se asocia a cambios tecnológicos, intensificación ganadera, expansión de la frontera agrícola, la tendencia de la agricultura hacia el monocultivo y está estrechamente relacionado con la sostenibilidad de los agroecosistemas (Manuel-Navarrete *et. al*, 2005).

De acuerdo con Rabinovich y Torres (2004) en la Argentina, la expansión agrícola hasta 1930 se basó principalmente en la ampliación de la frontera agropecuaria por ocupación de nuevas tierras. En cambio, desde 1960 hasta la actualidad este proceso ocurrió por el cambio en el uso de la tierra dedicada inicialmente a ganadería extensiva. El proceso de agriculturización comenzó en la pampa húmeda y, en los años 70, se extendió a zonas extrapampeanas (Morello, 2005). En general, se ha buscado maximizar la rentabilidad y el rápido retorno económico que ofrecen los granos en comparación con la ganadería (Rearte, 1996).

En la Región Pampeana, la agricultura continua asociada al uso de sistemas de labranza agresivos y la tendencia cada vez mayor hacia el monocultivo de soja, han provocado el deterioro de la calidad edáfica (Buschiazzo *et al*, 1998). La calidad de un suelo es en muchos casos definida por las funciones que éste cumple en el agroecosistema: proporciona un medio para el crecimiento de las plantas y la partición del flujo de agua en el medio ambiente, y sirve como un buffer ambiental en la formación, atenuación y la degradación de compuestos peligrosos (Larson, Pierce, 1994). Doran y Parkin (1994) la definen como la capacidad del suelo para funcionar dentro de los límites de los ecosistemas, para mantener la productividad biológica, mantener la calidad del medio ambiente y promover la sanidad vegetal y animal. Es decir, la calidad del suelo afecta tres facetas esenciales del manejo sustentable del mismo: la productividad de los cultivos y el ganado, la calidad de los recursos naturales, y la salud de plantas, animales y humanos (Doran; Jones, 1996).

La degradación de los suelos por uso agrícola intensivo se refleja en alteraciones de sus propiedades físico-químicas (Salinas-García *et al.*, 1997; Díaz-Zorita *et al.*, 2004) y en la disminución de los contenidos de materia orgánica (MO), como así también en la alteración de los ciclos de los nutrientes y en la contaminación de aguas superficiales y subterráneas con nutrientes y biocidas (Michelena *et al.*, 1989; Maddonni *et al.*, 1999; Urricariet; Lavado, 1999, Micucci; Taboada, 2006). Todo ello se

asocia a la disminución de la calidad del suelo. En contrapartida, la producción agrícola continua mejora los servicios ambientales relacionados con la producción de alimentos (Manuel-Navarrete *et al.*, 2005). Es por ello que para el logro de una producción sostenible (Karlen *et al.*, 1997), se deben contemplar las acciones necesarias para que el suelo pueda mantener y/o mejorar su condición y, con ello, la capacidad de permitir el desarrollo de los cultivos (Doran *et al.*, 1996; Janzen, 2006). Por tanto, es necesario contar con mecanismos de evaluación que permitan caracterizar el estado de calidad del suelo para tomar decisiones de manejo en consecuencia. Larson y Pierce (1994), propusieron el desarrollo de un conjunto mínimo de datos o indicadores para estimar los parámetros reales cuando no se dispone de mediciones.

Un buen indicador debe cuantificar una o más funciones; ser suficientemente sensible para reflejar cambios; proveer valores críticos o umbrales; ser de fácil interpretación, y ser sencillo y económico de obtener (Doran *et al.*, 1996; Doran; Parkin, 1994). Los indicadores de calidad edáfica se refieren a atributos cuantificables que influyen la capacidad del suelo para producir cultivos o realizar funciones ambientales (Arshad; Martin, 2002). Entre los atributos más sensibles a los cambios producidos por las prácticas de manejo se han citado: contenido de MO (principalmente sus fracciones lábiles), respiración, agregación, densidad aparente (DAP), infiltración, disponibilidad de nutrientes y capacidad de retención de agua (Doran *et al.*, 1996; Arshad; Martin, 2002; Carter, 2002). Tales atributos son adecuados para ser empleados como indicadores de calidad de suelo.

La compactación del suelo es cuantificada generalmente a través de la medición de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) o de la DAP (Amato; Ritchie, 2002). Si bien algunos autores citan a la RMP como más sensible que la DAP para detectar efectos de labranzas (Bauder; Black, 1981; Hammel, 1989), se considera a esta última como una medición más estable que la RMP, ya que es menos afectada por el contenido de agua del perfil (Vepraskas, 1988; Yoo; Wander, 2006). Densidades entre 1,4 y 1,5 Mg m<sup>-3</sup> inhibirían el crecimiento de las raíces en suelos franco arcillo limosos, pero ellas tolerarían hasta 1,7 Mg m<sup>-3</sup> en suelos arenosos con bajo contenido de materia orgánica (Griffith *et al.*, 1977). Para numerosas especies vegetales el valor promedio de la máxima presión de crecimiento de las raíces oscila entre 0,9 y 1,3 MPa. En estadios tempranos de desarrollo del cultivo, valores superiores de RMP pueden afectar el crecimiento de la radícula. En etapas más avanzadas, ese umbral

varía entre 2 y 2,5 MPa, afectando el crecimiento en longitud de las raíces cuando se registran valores mayores (Grant; Lafond, 1993; Narro Farias, 1994).

Una estimación indirecta de la capacidad de almacenar agua y aire en la zona de exploración de las raíces es a través de la estabilidad estructural (EE), ya que el estado de agregación influencia el movimiento y la disponibilidad de agua y aire para las plantas (Reynolds *et al.*, 2002; Dexter, 2004). La pérdida de estructura se ve reflejada principalmente en la formación de costras, en un mayor escurrimiento superficial y en la compactación superficial o subsuperficial. Varios autores consideran a la estabilidad de agregados como la variable que mejor refleja los cambios producidos por las prácticas de manejo (de Orellana; Pilatti, 1994; Gregorich *et al.*, 1997; Wilson *et al.*, 2001; Álvarez *et al.*, 2008).

La EE presenta una estrecha relación con el contenido de carbono orgánico total (COT) ya que aquélla se incrementa con el aumento en el contenido de MO (Elliott, 1986; Blanco-Canqui *et al.*, 2005; Ferreras *et al.*, 2007). La estructura afecta el COT principalmente por la oclusión de la MO dentro de los agregados (Zinn *et al.*, 2007). Varios estudios (Six *et al.*, 2000; Deneff *et al.*, 2004) han mostrado la importancia de los microagregados y especialmente, la de los microagregados dentro de macroagregados en la protección y estabilización del carbono orgánico (C). Kong *et al.* (2005) demostraron la estabilización preferencial de C en los microagregados que son aislados desde pequeños macroagregados, y señalan que esta fracción, es un indicador ideal del secuestro potencial de C en los agroecosistemas.

El fraccionamiento de la MO permite distinguir *pooles* específicos de C que responden al manejo, ya que posibilita identificar el control físico de la MO y caracterizar la relación entre ésta y la distribución de tamaño de agregados (Tan *et al.*, 2007). Chan *et al.* (2002) reportaron que la estabilidad de los microagregados, particularmente aquéllos < 0,05 mm, está relacionada con el C en la fracción del suelo < 53  $\mu\text{m}$ , en tanto, la estabilidad de los macroagregados (> 2 mm) está determinada por las formas temporarias de C en el suelo, tales como raíces e hifas de hongos y, por ende, más sensible a las prácticas de manejo. Por lo tanto, la proporción de macroagregados estables es considerada buena predictora de la respuesta potencial del C a las labranzas debido a la importancia que tienen en la protección de la fracción lábil (Grandy; Robertson, 2006).

Según su tamaño se puede distinguir la MO particulada (MOP) y la MO asociada a los minerales (MOA). La MOP (MO en la fracción del suelo mayor que 53  $\mu\text{m}$ ) consiste en residuos de plantas y animales parcialmente descompuestos con un rápido ciclado,

es más sensible a los factores de manejo y posee gran importancia en la provisión de nutrientes. La MOA (MO en la fracción del suelo menor que 53  $\mu\text{m}$ ) está compuesta por productos de descomposición más procesados en íntima asociación con las partículas de suelo, tiene un lento reciclado y es importante en el mantenimiento de la estructura del suelo y en el secuestro de C (Murage *et al.*, 2007). La fracción lábil es crucial para la interpretación de los cambios de fertilidad, por lo que puede ser utilizada como un indicador de calidad (Quiroga *et al.*, 2006). Varios estudios sugieren que la MOP es más sensible a las prácticas de manejo, tales como labranzas y fertilización, que la concentración de MO (Cambardella; Elliott, 1992; Wander *et al.*, 1994).

Las labranzas ejercen una marcada influencia tanto sobre el funcionamiento del suelo como sobre el comportamiento de los cultivos, condicionando las relaciones suelo-planta (Domínguez *et al.*, 2005). También modifican algunas propiedades físicas, como la estructura, la DAP, la distribución de poros, la dinámica del agua y la RMP (Lal, 1994; Buschiazzi *et al.*, 1998; Taboada; Micucci, 2002).

Las labranzas agresivas, como la labranza convencional (LC), producen ruptura de macroagregados por acción física directa y estimulan el potencial oxidativo de las poblaciones microbianas (Ferrerías *et al.*, 2001), lo que origina la pérdida de MO al exponer las fracciones protegidas dentro de éstos a la acción de los microorganismos (Tisdall; Oades, 1982; Franzluebbers *et al.*, 1995). Tan *et al.* (2007) obtuvieron una mayor proporción de MOA bajo LC en comparación con siembra directa (SD), lo que implica una débil protección física de la MOP bajo labranza debido al disturbio generado en el suelo. No obstante, esa mineralización de la MO se traduce en una mayor disponibilidad de nutrientes para los cultivos (Domínguez *et al.*, 2005; Janzen, 2006). Por otro lado, las labranzas conservacionistas (p.e. SD) se caracterizan por la presencia de rastrojos en superficie y la reducción al mínimo indispensable de las operaciones de laboreo. Con ello se reducen los riesgos de erosión, se mejora la conservación del agua y se mantienen o mejoran las propiedades del suelo (Lal, 1989). La presencia de residuos en superficie proporciona protección frente al impacto de las precipitaciones, por lo que se reduce la posibilidad de encostramiento, y a su vez, disminuye la evaporación debido a la reducción de la temperatura del suelo y al efecto moderador de los rastrojos sobre la acción del viento. La ausencia de remoción permite contar con un sistema poroso más estable y con un mayor número de bioporos, lo que se traduce en mayor conductividad hidráulica y mayor retención de agua, y por lo tanto, se logra una mayor infiltración y menor escurrimiento superficial (Gil; Garay, 2001). A su vez, el empleo de SD, origina la estratificación de la MO

verificándose mayores contenidos en los primeros centímetros superficiales (Wander *et al.*, 1998; Needelman *et al.*, 1999; Franzluebbbers, 2002; Eiza *et al.*, 2005; Fabrizzi *et al.*, 2005; Galantini *et al.*, 2006; Domínguez *et al.*, 2009). Esto es el resultado de la falta de incorporación de los residuos y debido a que no se altera el ordenamiento natural de los componentes sólidos del suelo (Quiroga *et al.*, 1998; Gil; Garay, 2001). Además, la SD se asocia a menores disponibilidades de nutrientes, principalmente nitrógeno (N). La menor temperatura, el mayor contenido de agua y la permanencia de residuos en superficie generan condiciones que afectan la disponibilidad de N para los cultivos, ya sea por inmovilización, menor mineralización o por aumentos de pérdidas por desnitrificación y/o volatilización (Fox; Bandel, 1986).

La SD genera cambios en la geometría de los poros en los primeros centímetros de suelo (Sasal *et al.*, 2006) así como también, DAP y RMP más elevadas (Wander; Bollero, 1999; Ferreras *et al.*, 2001; Colombani *et al.*, 2002; Kay; VanderBygaart, 2002; Fabrizzi *et al.*, 2005; Álvarez; Steinbach, 2009). De acuerdo con Chaney *et al.* (1985) y con Hubbard *et al.* (1994) la DAP bajo SD aumentaría durante el ciclo de cultivo y a través de los años para luego alcanzar un equilibrio después del tercer año bajo este sistema de labranza. En cambio, Dardanelli y Gil (1997) luego de diez años observaron valores de DAP menores comparados con LC, lo que atribuyeron a la posible recomposición de las propiedades físicas del suelo debido a la ausencia de remoción y al aumento de la actividad biológica. Por otra parte, Krüger (1996) y Domínguez *et al.* (2009) no encontraron diferencias estadísticas entre sistemas de laboreo. En tanto, otros autores encontraron mayores densidades en SD sólo en superficie (Vidal; Costa, 2000; Elissondo *et al.*, 2001).

Así como las labranzas, la rotación de cultivos es una práctica que afecta las propiedades del suelo y el comportamiento de los cultivos que se desarrollan en él. Los efectos de las rotaciones se relacionan con la posibilidad de incluir cultivos con diferentes requerimientos hídricos y nutricionales, y con distintos sistemas radicales que influyen sobre la agregación del suelo. Las rotaciones permiten discontinuar ciclos de malezas, plagas y enfermedades, manejar la cobertura del suelo y la disponibilidad de N (Tisdall; Oades, 1982; Bullock, 1992; Power, 1994).

La elección de los cultivos en la secuencia permite manejar el momento, la cantidad, la calidad, la forma de retorno de C al suelo y los factores que influyen sobre su transformación (Campbell, 1978; Studdert; Echeverría, 2000; Domínguez *et al.*, 2001; Six *et al.*, 2002). Una mayor frecuencia de cultivos que aporten gran volumen de

rastrajos y raíces, y con alta relación carbono-nitrógeno (C/N) permite reducir la tasa de disminución del contenido de MO.

La presencia de pasturas en la rotación incrementa el N mineralizable respecto a suelos bajo agricultura continua (Echeverría *et al.*, 1994) y posibilita recomponer el contenido de MO (Studdert *et al.*, 1997), según el manejo que se realice en el ciclo agrícola. Es decir, que estos efectos van a depender de los cultivos que se incluyan en la rotación y del tipo de labranza que se implemente (Havlin *et al.*, 1990).

Al aumentar el número de años de historia agrícola, se manifiestan mayores pérdidas de fertilidad de los suelos y por ende, disminución de los rendimientos (Forján, 2000). Estas disminuciones de rendimiento serán mayores cuando la pastura previa sea de menor duración. Para suelos de Tres Arroyos bajo LC se ha determinado que la duración mínima de una pastura (en una secuencia de 10 años) para recuperar el contenido inicial de MO sería de 3,0, 4,0 y 6,5 años para las secuencias maíz-trigo-girasol, trigo-girasol y trigo-soja, respectivamente (Forján, 2000). Studdert *et al.* (1997) hallaron que en un Argiudol típico de Balcarce podrían recomponerse los valores iniciales de MO, aún con LC, incluyendo en la rotación un máximo de 7 años de cultivos agrícolas y un mínimo de 3 años de pastura.

La rotación de cultivos también afecta las propiedades físicas del suelo, principalmente debido a su efecto sobre la MO y al efecto de los diferentes sistemas radicales, ya que a través de la producción de mucílagos y por acción física inciden sobre la agregación y la porosidad (Tisdall; Oades, 1982).

Al igual que en el resto del país, en la región mixta cerealera del centro sur bonaerense, el incremento de la producción agrícola en los últimos 25 años ha sido constante y sostenido, no sólo por el mayor potencial de producción de todos los cultivos, sino también por la prolongación de los ciclos agrícolas y la incorporación de nuevas superficies (Forján, 2005). Este incremento en la superficie agrícola con mayor intensidad de uso de los suelos fue acompañado por una creciente adopción de la SD. No obstante, no se cuenta con información acerca del impacto en el mediano-largo plazo de la agricultura continuada con distintos sistemas de labranza sobre las propiedades de estos suelos y sobre el comportamiento de los cultivos. Surge entonces la necesidad de indagar sobre los efectos de la implementación de la SD y la LC sobre suelos representativos de la zona, como así también la de identificar parámetros edáficos que puedan ser utilizados como indicadores tempranos de los cambios producidos por las prácticas de manejo.

### **1.1 Hipótesis de trabajo**

Para un suelo representativo del Partido de Tres Arroyos bajo agricultura continua:

- El suelo bajo SD continua presenta mejores condiciones físicas y bioquímicas en la capa arable que bajo LC, independientemente de la historia previa de manejo.
- Las diferencias en las propiedades edáficas de la capa arable registradas al comparar SD y LC serán más marcadas cuando los sistemas se hayan aplicado a suelos con un uso agrícola más prolongado.
- Las diferencias en las propiedades edáficas entre SD y LC no se relacionan directamente con los rendimientos de los cultivos bajo esos sistemas de labranza.

### **1.2 Objetivo general**

- Evaluar el estado de calidad de suelo y su efecto sobre el comportamiento de los cultivos en condiciones de agricultura continua bajo SD y LC habiendo partido de condiciones de manejo previo diferentes.

### **1.3 Objetivos específicos**

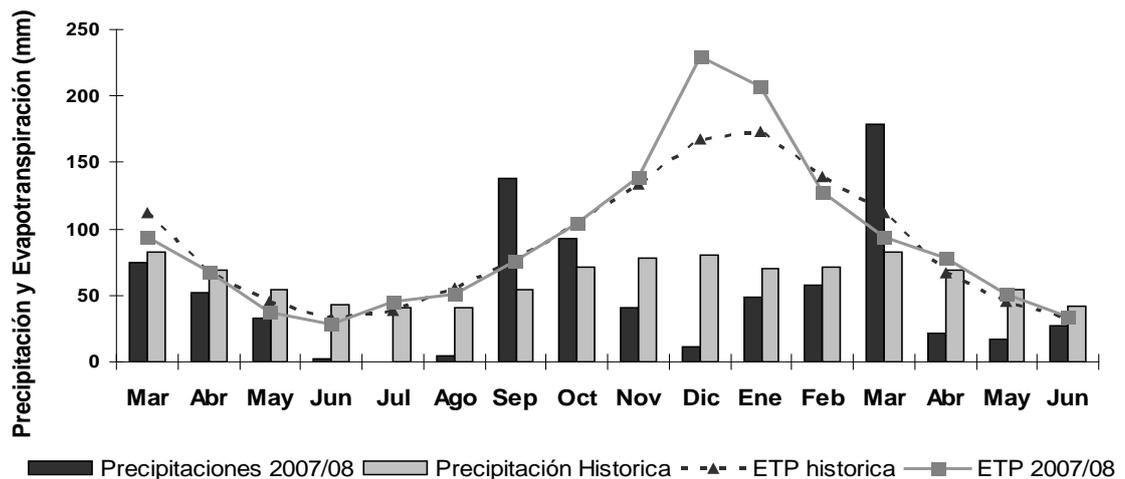
- Evaluar el cambio en algunas propiedades físicas y bioquímicas en la capa arable del suelo en condiciones de agricultura continua bajo SD y LC habiendo partido de diferentes condiciones de manejo previo.
- Relacionar las propiedades físicas y bioquímicas de la capa arable con el comportamiento de un cultivo de maíz.
- Comparar la condición bajo agricultura continua con una situación sin disturbar, y la evolución de las propiedades edáficas a través de los 10 años de ensayo.

## 2-MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Caracterización del sitio experimental

El trabajo se llevó a cabo durante la campaña 2007-2008 utilizando un ensayo de larga duración en la Estación Experimental Agropecuaria Integrada Barrow (EEAI Barrow), Tres Arroyos (38°19'25" S; 60°14'33" W) iniciado en 1997 con una secuencia girasol (*Helianthus annuus* L.) - trigo (*Triticum aestivum* L.) - maíz (*Zea mays* L.) - girasol – trigo sobre un suelo perteneciente a la Serie Tres Arroyos, clasificado a nivel de familia como Paleudol petrocálcico, fino, illítico, térmico, moderadamente somero ya que la profundidad de la tosca es, en promedio, de 75 cm. El suelo presenta un horizonte Ap/A2 de 22 cm negro pardusco (10YR 2/2) en húmedo, con textura franco arcillo arenosa y estructura en bloques subangulares, medios, moderados a fuertes que rompe en bloques subangulares, finos y estos, a granular. Es friable en húmedo. Posee intensa actividad biológica y raíces abundantes. La capacidad de almacenaje de agua útil para estos suelos es 78,5 mm hasta los 60 cm de profundidad, siendo el límite máximo 189,6 mm y el límite mínimo, 111,1 mm (Ing. Agr. M. Zamora, comunicación personal).

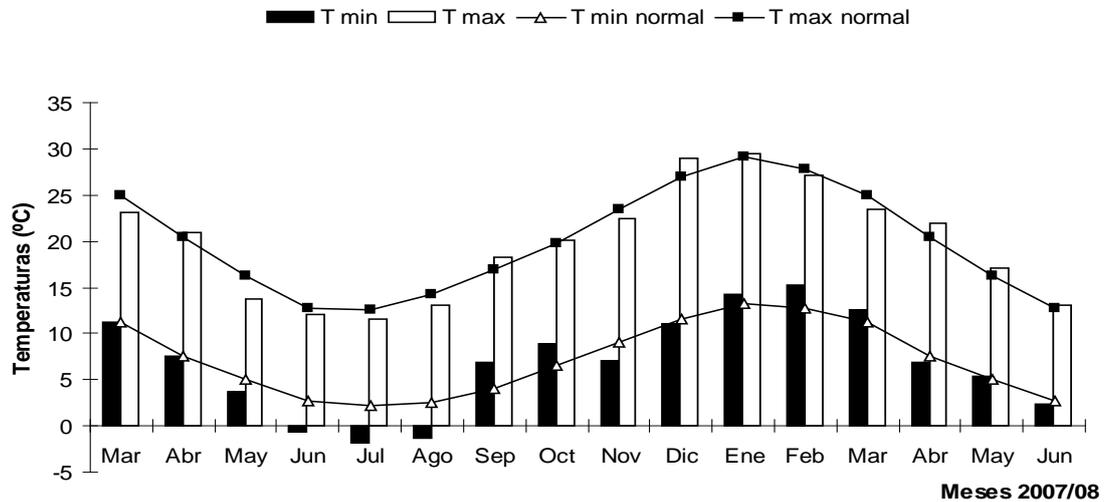
El régimen hídrico es subhúmedo con una precipitación media anual de 755 mm. En la Figura 1 se muestra la evapotranspiración y las precipitaciones durante 2007 y 2008 y las medias históricas en la EEA Barrow.



**Figura 1-** Precipitaciones y evapotranspiración (ETP 2007/08) ocurridas durante la campaña agrícola 2007-2008, y precipitaciones y evapotranspiración histórica (ETP histórica) durante el período 1938-2008 (Agrometeorología EEA Barrow).

La temperatura media anual es de 14,7 °C. El periodo libre de heladas en la zona es de aproximadamente 172 días, desde principios de noviembre hasta fines del mes

de abril. En la Figura 2 se muestran la temperatura mínima y la máxima para la campaña 2007-2008 y los valores normales para Barrow.



**Figura 2-** Temperatura máxima (T max) y mínima (T min) durante el desarrollo del ensayo (2007-2008) y temperatura máxima y mínima normal (T max normal y T min normal, respectivamente) en Barrow (Agrometeorología EEAI Barrow).

## 2.2 Tratamientos y diseño experimental

El diseño experimental del ensayo de larga duración es en bloques divididos (Khuel, 2001) con tres repeticiones. Se consideraron dos niveles del factor **historia previa**: 1) pastura durante cuatro años previo al inicio del ensayo (1993-1996), la cuál fue pastoreada, y 2) agricultura continua bajo LC durante 12 años (1985-1996), con una secuencia trigo-girasol, y dos niveles del factor **sistema de labranza** (implementados a partir de 1997): 1) SD y 2) LC (arado de reja y vertedera los primeros 2 años de ensayo, posteriormente y hasta la actualidad, se emplea rastra de discos, y eventualmente, cincel). Las unidades experimentales (UE) para la interacción historia previa x sistema de labranza poseen una dimensión de 15 x 35 m. El parque de la EEAI Barrow por su condición sin disturbar, se consideró como referencia para evaluar el estado de calidad actual de los suelos labreados.

Por otra parte, para evaluar la evolución de las propiedades edáficas a través del tiempo se empleó información disponible del ensayo correspondiente a los años 1997 (inicio) y 2002 (final de la primera secuencia de cultivos) y los obtenidos en el presente trabajo.

El 24 de octubre de 2007 se sembró maíz. El híbrido utilizado fue Dekalb 190 MG RR, sembrado a una densidad de 62000 plantas ha<sup>-1</sup> con un distanciamiento entre hileras de 52 cm. El manejo previo a la siembra consistió en una aplicación de

glifosato (marzo), rastra de discos (fines de julio) y cincel y rastra de dientes (septiembre) en las parcelas bajo LC. En SD se aplicó glifosato en marzo, julio y octubre. Al momento de la siembra todo el ensayo fue fertilizado con 120 kg ha<sup>-1</sup> de fosfato diamónico.

Desde el inicio del ensayo, la fertilización se realiza de acuerdo al manejo tradicional en la zona para cada sistema de labranza, donde las mayores dosis se aplican en SD. En el año 2007 con el propósito de comparar la respuesta a la fertilización nitrogenada se establecieron 3 microparcels (4 surcos por 7 m de largo) en cada UE correspondiente a la interacción historia previa x sistema de labranza. En el estadio de 6 hojas del maíz (V<sub>6</sub> de acuerdo a Ritchie; Hanway, 1982) se aplicaron las dosis de 0, 70 y 120 kg N ha<sup>-1</sup> como UAN (32-00-00).

### **2.3 Mediciones en suelo**

Las determinaciones de las variables edáficas se efectuaron en las UE y en el parque de la EEAI Barrow (condición sin disturbar), en el cuál se tomó el mismo número de muestras o determinaciones que en una UE.

#### **2.3.1 Contenido de agua**

Se evaluó el contenido de humedad gravimétrica previo a la siembra, a la siembra, en antesis y en madurez fisiológica del maíz. Se tomó 1 muestra compuesta por UE a cuatro profundidades: 0-5, 5-20, 20-40 y 40-60 cm

#### **2.3.2 Densidad aparente**

En julio de 2007 se extrajeron 6 muestras de suelo sin disturbar en cada UE con el método del cilindro (Blake; Hartge 1986), a dos profundidades: 3-8 y 13-18 cm. Se utilizó un muestreador manual provisto de cilindros de acero inoxidable de 48 mm de diámetro y 55,3 mm de altura. Para el análisis estadístico, se consideró el valor promedio de las 6 muestras para cada UE.

Para el cálculo de la DAP se empleó la formula:

$$DAP = \frac{PSS - t}{VC}$$

donde: PSS: peso del cilindro más suelo seco (g), t: tara del cilindro (g), VC: volumen del cilindro (cm<sup>3</sup>). Los valores de DAP se expresaron como Mg m<sup>-3</sup>.

Para hacer relaciones entre DAP y las otras variables evaluadas, se asumió que la profundidad de 3-18 cm es representativa del estrato 0-20 cm.

### 2.3.3 Resistencia mecánica a la penetración

La RMP se midió previo a la siembra con un penetrómetro de cono (30°) con registro electrónico (FIELDSCOUT SC-900) hasta los 20 cm con intervalos de 2,5 cm. Para su análisis estadístico se tomó el valor promedio de 18 determinaciones en cada UE.

### 2.3.4 Estabilidad de agregados

El muestreo se realizó previo a la siembra (julio de 2007) a dos profundidades: 0-10 y 10-20 cm a razón de 1 muestra (3 submuestras) por UE. Para la determinación de la estabilidad de agregados se empleó el método de “Cambio en el Diámetro Medio Ponderado” de De Leenher y de Boodt (1958).

El cambio de diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP, mm) es un índice inverso de la EE, por lo cual, a mayor CDMP, menor es la estabilidad de ese suelo. El CDMP se calculó por diferencia entre el diámetro de peso medio (DPM, mm) del tamizado en seco y el de tamizado en agua. Éste es un índice inverso de la EE

El DPM se calculó según:

$$DPM = \sum_{i=1}^n x_i \cdot w_i$$

donde  $i$  es cada fracción de agregados,  $n$  es el número total de fracciones de agregados incluyendo la que pasa a través del tamiz más fino,  $x_i$  es el diámetro promedio de cada fracción  $i$  (mm), calculado como la media aritmética de la apertura de malla de dos tamices consecutivos y  $w_i$  es la proporción del peso de cada fracción  $i$  respecto de la muestra total tamizada.

### 2.3.5 Carbono orgánico

Para la determinación de carbono orgánico se recolectó 1 muestra compuesta por UE a las profundidades de 0-5 cm y de 5-20 cm en julio de 2007. A través del promedio ponderado de los valores registrados en las dos profundidades de muestreo, se obtuvieron los contenidos de CO en el estrato 0-20 cm. Las muestras fueron secadas en estufa y molidas hasta pasar por el tamiz de 2 mm de apertura de malla. Para determinar la cantidad de CO particulado (COP) y de CO asociado a la fracción mineral (COA) se realizó el fraccionamiento físico de las muestras por tamizado en

húmedo (Cambardella; Elliott, 1992). La concentración de C en cada fracción se determinó por combustión húmeda (Schlichting *et al.*, 1995), con mantenimiento de la temperatura de reacción (120 °C durante 90 min.).

### **2.3.6 Contenido de nitrógeno de nitrato**

Los muestreos se realizaron en el momento de la siembra del maíz (1 muestra compuesta por UE), en V<sub>6</sub> y en madurez fisiológica (1 muestra compuesta por microparcela) de 0-60 cm de profundidad. Las muestras traídas del campo fueron secadas en estufa a 30° C y posteriormente molidas. El contenido de N de nitrato (N-NO<sub>3</sub>) se determinó por colorimetría (Keeney; Nelson, 1982).

## **2.4 Mediciones en el cultivo de maíz**

### **2.4.1 Materia seca y contenido de N**

En V<sub>6</sub> se tomaron 15 plantas por UE para la determinación de MS. En madurez fisiológica se tomaron 15 plantas por microparcela de fertilización en cada UE y se registró el peso seco aéreo y de raíces. Las muestras fueron secadas a 60° C hasta peso constante y molidas. En laboratorio se evaluó el contenido de N por Kjeldahl (Bremner, 1996) en planta (madurez fisiológica) y en grano (a cosecha). Se determinó el N acumulado en planta utilizando los valores de concentración de N total y materia seca.

En el momento de la cosecha del maíz se observó la distribución superficial de raíces por el método de la grilla (Bohm, 1979) empleando un marco cuadrado de 28 cm de lado con celdas de 2 x 2 cm. Se realizó una calicata para una parcela bajo LC y para otra bajo SD con la planta de maíz en el centro de la misma y se registró presencia o ausencia de raíces en cada celda.

### **2.4.2 Rendimiento y componentes**

Para la estimación del rendimiento (14% de humedad) se cosecharon manualmente las espigas de 2 surcos de 7 m de longitud. Se tomaron 10 espigas para determinar el número de granos por unidad de superficie y peso individual de los granos. En laboratorio se determinó el contenido de nitrógeno (Kjeldahl) en grano (Bremner, 1996).

## **2.5 Análisis estadístico**

### **2.5.1 Datos campaña 2007-2008**

Los datos fueron analizados separadamente por profundidad de muestreo empleando el procedimiento PROC MIXED del paquete estadístico Statistical Analysis Systems (SAS Institute Inc., 1999).

### **2.5.2 Comparación con la situación sin disturbar**

La comparación de los datos de DAP, RMP, CDMP y las fracciones de C (COA, COP y COT) observados en el parque (situación sin disturbar) con los obtenidos para los 4 tratamientos del ensayo se realizó considerándolos como un estudio observacional y utilizando contrastes (Kuehl, 2001) de interés (parque versus cada una de las cuatro combinaciones de historia previa y sistema de labranza).

### **2.5.3 Evolución de las variables edáficas**

Se evaluó la evolución de DAP (3-8 cm y 13-18 cm), CDMP (0-20 cm), COT (0-20 cm) y RMP (hasta 20 cm de profundidad, a intervalos de 5 cm con penetrómetro de cono CN-970 SOILTEST en 1997 y 2002 (Bradford, 1986) y FIELDSCOUT SC-900 en 2007) a través de los años. Para esto se empleó la información proporcionada por el responsable del ensayo (Ing. Forján) correspondiente a los años 1997 (inicio) y 2002 (final de la primera secuencia de cultivos) y los obtenidos en el presente trabajo. En el análisis estadístico no se incluyó el año 1997 ya que sólo se cuenta con valores promedio para cada historia previa (agricultura y pastura), por lo cuál los valores al inicio del ensayo se representaron gráficamente y los resultados obtenidos en 2002 y 2007 se compararon estadísticamente. El análisis estadístico se realizó considerando a los datos como medidas repetidas a través del tiempo en las mismas UE. Para la selección de la matriz de covarianza que presenta mejor ajuste se utilizaron criterios de información (AIC-BIC) (Littell *et al.*, 2006).

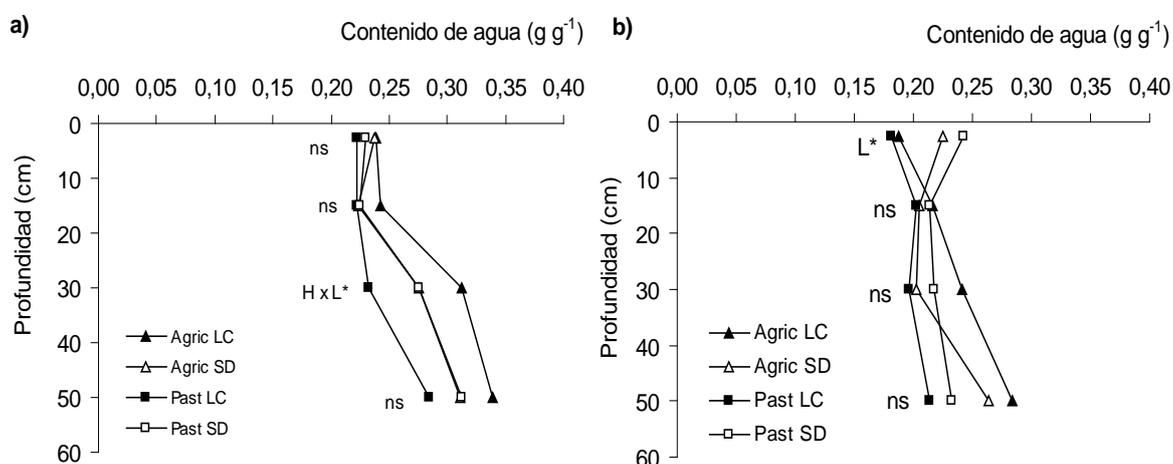
### 3- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Mediciones en suelo durante la campaña 2007-2008

##### 3.1.1 Contenido de agua

En el muestreo previo a la siembra (Figura 3a), en los primeros 20 cm de profundidad y en el estrato de 40-60 cm no se detectó ni interacción ni efecto principal ( $P>0,05$ ) de los factores historia previa y sistemas de labranza sobre el contenido de agua del suelo. Por el contrario, en la capa de 20-40 cm la interacción “historia x labranza” fue estadísticamente significativa ( $P<0,05$ ). Las parcelas con historia de pastura bajo LC tuvieron un contenido de agua significativamente menor que bajo SD (23,2% y 27,5%, bajo LC y SD, respectivamente). En cambio, con historia agrícola el contenido de agua no difirió ( $P>0,05$ ) entre sistemas de labranza (31,2% y 27,6%, bajo LC y SD, respectivamente)

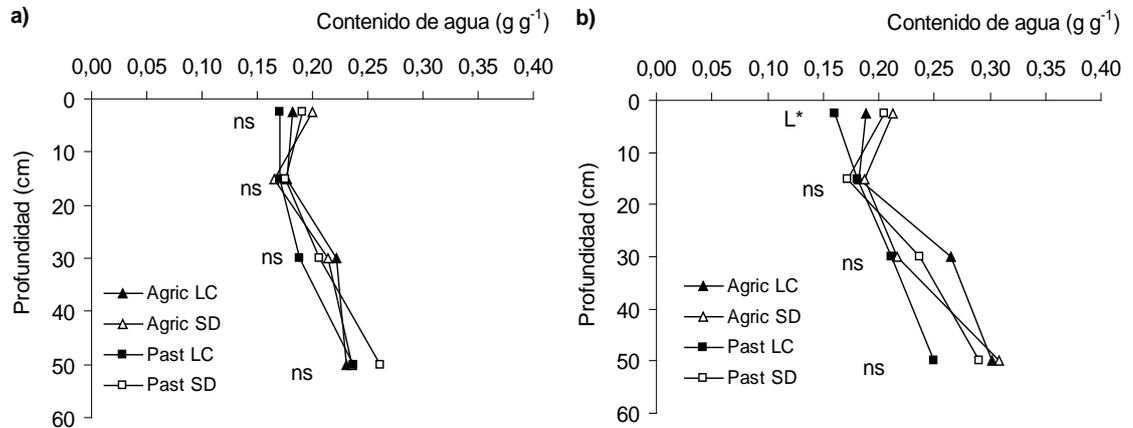
A la siembra (Figura 3b), se observó un mayor contenido de agua ( $P<0,05$ ) de 0-5 cm de profundidad a favor de SD respecto a LC (23,4% y 18,5%, respectivamente). En las profundidades restantes no se detectó interacción ni efectos de historia previa ni sistema de labranza ( $P>0,05$ ).



**Figura 3** - Contenido de agua ( $\text{g g}^{-1}$ ) hasta 60 cm de profundidad previo a la siembra (a) y a la siembra (b) para los tratamientos con historia de pastura (Past) y agricultura (Agric.) bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC). ns= ausencia de interacciones y efectos principales estadísticamente significativos, HxL \*= interacción significativa historia x labranza, L\*= únicamente diferencias significativas debidas al efecto principal de sistema de labranza.

En antesis (Figura 4a) no se registró interacción ni efectos significativos de ninguno de los factores ( $P>0,05$ ). En tanto, en madurez fisiológica (Figura 4b) se observaron diferencias significativas ( $P<0,05$ ) en los primeros 5 cm de suelo debidas al sistema de labranza, con mayor contenido de agua bajo SD ( $0,21 \text{ g g}^{-1}$ ) respecto a LC ( $0,17 \text{ g g}^{-1}$ ).

En las profundidades restantes no se detectó interacción ni efecto de ninguno de los factores ( $P>0,05$ ).



**Figura 4-** Contenido de agua ( $\text{g g}^{-1}$ ) hasta 60 cm de profundidad en antesis (a) y madurez fisiológica (b) para los tratamientos con historia de pastura (Past) y agricultura (Agric.) bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC). ns= ausencia de interacciones y efectos principales estadísticamente significativos y L\*= únicamente diferencias significativas debidas al efecto principal de sistema de labranza.

Numerosos autores citan las ventajas del empleo de SD en lo referido al balance hídrico de los suelos y a la eficiencia de uso del agua (Marelli, 2001; Dardanelli *et al.*, 2003). Bajo este sistema de labranza aumenta la proporción de poros de menor tamaño que posibilitan mayor retención de agua (Hill; Cruse, 1985; Dao, 1993; Azoos; Arshad; 1996), mejora la infiltración, lo que permite en general obtener mayores contenidos hídricos en superficie (Nielsen *et al.*, 2005) y disminuye la tasa de evaporación por la presencia de rastrojos en superficie (Blevins *et al.*, 1971; Sauer *et al.*, 1996). Sin embargo, si no ocurren precipitaciones frecuentes, los suelos desnudos, debido al desecamiento de la superficie, incrementan su resistencia a la evaporación antes que los suelos con cobertura, compensando así la mayor tasa evaporativa que presentan cuando el suelo está húmedo (luego de una lluvia o riego importantes), por lo que la pérdida de agua desde la superficie de suelos con y sin rastrojos tendería a igualarse (Cooper *et al.*, 1987).

La inclusión de pasturas en la rotación permite mejorar la estructura del suelo y de este modo, favorecer la infiltración y almacenaje de agua (Hermavan; Cameron, 1993), ya que la gran producción de biomasa aérea y radical origina un incremento en el contenido de compuestos orgánicos del suelo, y a través del continuo crecimiento y muerte de las raíces, se intensifica la producción de agentes ligantes (Tisdall; Oades, 1982; Bronick; Lal, 2005).

Sin embargo, contrariamente a lo esperado, no se observaron diferencias marcadas en el contenido de agua bajo SD respecto a LC, ni con historia de pastura en comparación con historia agrícola, lo que podría deberse a los menores registros pluviométricos registrados en la campaña 2007-2008 respecto a la media histórica, así como también a la distribución muy irregular de las lluvias (Figura 1).

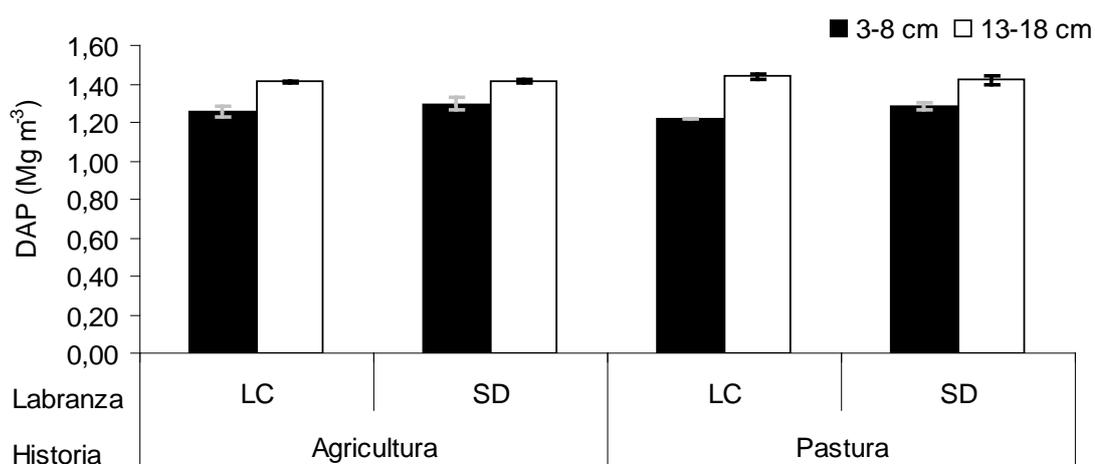
Las determinaciones realizadas a la siembra y en antesis son las de mayor relevancia al momento de evaluar el comportamiento del cultivo de maíz, ya que en el primer caso las deficiencias hídricas podrían afectar la emergencia del cultivo, y en el segundo, porque es el periodo en el cual el rendimiento en grano se torna altamente dependiente de la disponibilidad hídrica (Shaw, 1988). A la siembra, en los primeros 20 cm, el suelo presentaba alrededor de un 50 % de agua útil, promedio para los 4 tratamientos, por lo que el crecimiento inicial de las plántulas no se vería reducido, ya que se considera limitante cuando el contenido hídrico en etapas previas a la floración es inferior al 40% de la fracción de agua útil (Sinclair *et al.*, 1984). En cambio, en antesis, momento donde se centra el periodo crítico para la determinación del rendimiento del maíz (Cárcova *et al.*, 2003), se observaron los menores contenidos de agua (47% de agua útil hasta los 60 cm de profundidad) y éstos fueron inferiores al 60% de agua útil, contenido hídrico considerado crítico de acuerdo a Sinclair *et al.* (1984). Los menores contenidos de agua en esta etapa estarían asociados a la mayor demanda atmosférica y las menores precipitaciones registradas desde noviembre del 2007 hasta febrero del 2008 respecto a los valores históricos (Figura 1) y al incremento de la demanda del cultivo a partir de  $V_6$  hasta floración (Andrade; Gardiol, 1995). Los resultados obtenidos se contraponen con lo informado por Rizzalli (1998) y Domínguez *et al.* (2001) para suelos de Balcarce en los cuales bajo SD se observó una mayor disponibilidad de agua en floración.

### **3.1.2 Densidad aparente**

La condición física del suelo en los estratos superiores incide sobre la implantación y el desarrollo inicial de los cultivos. En el caso de la DAP, ésta afecta la emergencia por cambios en el volumen y en la continuidad de los poros de la cama de siembra (Nasr; Seles, 1995). Incrementos en la DAP del suelo resultan en una menor proliferación de raíces y menores tasas de movimiento de agua y aire (Taylor; Ratliff, 1969; Álvarez; Steinbach., 2009).

No se registró interacción ni efectos significativos ( $P > 0,05$ ) sobre la DAP de historia previa y de sistema de labranza a ninguna de las profundidades analizadas. No

obstante, se observó una tendencia a mayor densificación bajo SD (Figura 5) de 3 a 8 cm (1,24 vs. 1,29 Mg m<sup>-3</sup> para LC y SD, respectivamente) y con historia agrícola (1,28 Mg m<sup>-3</sup>) respecto a historia de pastura (1,25 Mg m<sup>-3</sup>), aunque posiblemente estas diferencias no tengan implicancias para el normal establecimiento del cultivo. En cambio, de 13 a 18 cm de profundidad los valores de DAP fueron similares en ambos sistemas de labranza (1,43 Mg m<sup>-3</sup>) y en ambas historias previas (1,41 y 1,42 Mg m<sup>-3</sup> para historia agrícola y con pastura, respectivamente).



**Figura 5**– Densidad aparente (DAP) para las historias pastura y agricultura bajo los dos sistemas de labranza, siembra directa (SD) y labranza convencional (LC), en los estratos de 3 a 8 cm y de 13 a 18 cm. Las barras indican el error estándar del análisis.

Si bien la DAP de 13-18 cm fue superior que a menor profundidad, lo que estaría reflejando compactación subsuperficial, los valores obtenidos fueron levemente inferiores a los citados por Vehimeyer y Hendrickson (1948) quienes determinaron una DAP de 1,46 Mg m<sup>-3</sup> como umbral crítico para el desarrollo radical de gramíneas. En cambio, en ambos estratos los valores obtenidos fueron superiores a los informados por Ressia *et al.* (1998) para el centro de la provincia de Buenos Aires, donde valores superiores a 1,20 Mg m<sup>-3</sup> redujeron los rendimientos de maíz en alrededor de 30%.

En la bibliografía se citan resultados disímiles en cuanto al efecto de los sistemas de labranza sobre la DAP (Strudley, *et al.*, 2008). Aparicio y Costa (2007), trabajando en Argiudoles típicos en el Sudeste Bonaerense, encontraron diferencias significativas entre sistemas de labranza (SD y LC) sólo en el estrato de 3-8 cm, con valores superiores bajo SD. A diferencia de lo hallado en el presente ensayo, estos autores mencionan que la DAP es un parámetro muy afectado por las labranzas. Para un amplio rango de tipos de suelo, otros autores (Lampurlanés; Cantero-Martínez, 2003; Fabrizzi *et al.*, 2005; Yoo *et al.*, 2006; Álvaro Fuentes *et al.*, 2008; Carrasco *et al.*,

2008) informaron mayor densificación en la capa más superficial del suelo bajo SD que bajo LC, lo que está asociado a la consolidación natural del suelo por falta de remoción y al tráfico de maquinarias (Blevins; Frye, 1993).

Otros autores han reportado valores de DAP superiores bajo LC respecto a labranzas conservacionistas (Sánchez; García, 1998; Lei *et al.*, 2008), lo que podría ser consecuencia de la mayor actividad biológica generada en los últimos asociada a un incremento en el número de bioporos (Francis; Knight, 1993), especialmente por acción de las lombrices (Lal, 1976). Botta *et al.* (2004) citan que estos resultados contrastantes entre experiencias estarían relacionados con el peso de la maquinaria empleada, el ancho y presión de inflado de los neumáticos, el número de pasadas de maquinaria, así como también con el contenido de agua en el suelo cuando se laborea.

La falta de efectos significativos del sistema de labranza sobre la DAP en este trabajo concuerda con lo reportado por Krüger (1996); Ferreras *et al.* (2000), Barrios *et al.* (2008) y Domínguez *et al.* (2009). Asimismo, la ausencia de diferencias estadísticas debidas a historia previa coincide con Arshad *et al.* (2004), quienes no hallaron diferencias en DAP cuando compararon rotaciones con pasturas y diferentes rotaciones basadas en trigo. En cambio, se opone a lo informado por García-Préchac *et al.* (2004) quienes en suelos de Uruguay hallaron una reducción de la DAP luego de tres años de pastura en una rotación con cultivos de cosecha, y a lo informado por Colombani *et al.* (2002) para suelos de Balcarce, ya que obtuvieron mayor DAP en subsuperficie con historia agrícola continua respecto a la rotación con pasturas.

En el presente estudio, la ausencia de diferencias significativas entre SD y LC estaría relacionada, por un lado, con el manejo cuidadoso que se realiza en el ensayo, ya que las labores no se efectúan con elevados contenidos de agua en el suelo y también, a que el número de pasadas con maquinaria es reducido. Por otro lado, se relacionaría con las características del suelo, que posee textura franco arcillo arenosa con moderado contenido de MO, por lo que la susceptibilidad a la compactación no es tan elevada como la que se espera en suelos con mayor contenido de limo y con bajo porcentaje de MO (Quiroga *et al.*, 1999; Álvarez *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008). Por otra parte, si bien se cita que la implantación de pasturas mejora las propiedades físicas del suelo (Campbell, 1978; Oades, 1984), luego de 10 años de agricultura continua ya no serían evidentes los efectos benéficos de la pastura previa al inicio del ensayo.

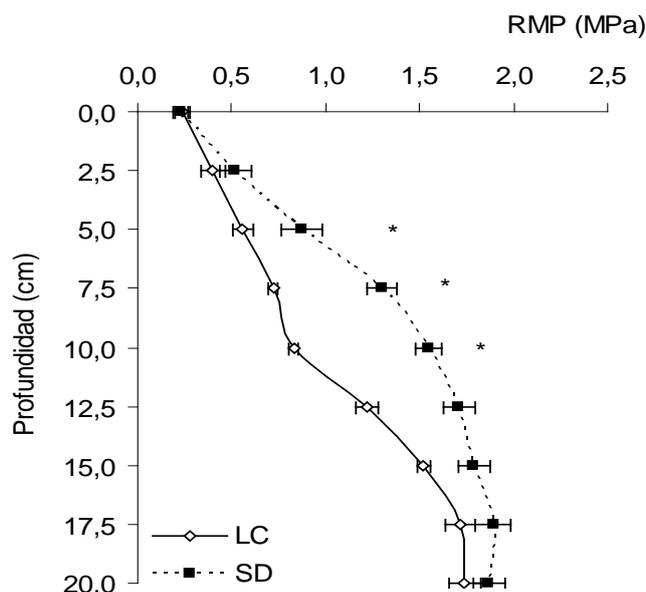
### 3.1.3 Resistencia mecánica a la penetración

La compactación del suelo puede ser evaluada mediante la DAP y la RMP, pero esta última es más sensible que la DAP para diferenciar sistemas de manejo (Hammel, 1989; Elissondo *et al.*, 2001; Álvarez *et al.*, 2006). La compactación ocasiona cambios en procesos químicos y biológicos del suelo, lo que puede afectar la provisión de agua y nutrientes para el cultivo (Soane; Van Ouwerkerk, 1995).

La RMP es función del contenido de agua del suelo (Gupta; Allmaras, 1987; Soane; Van Ouwerkerk, 1995; Quiroga *et al.*, 1999; Fabrizzi *et al.*, 2005), por lo que, cuando se comparan situaciones de manejo que pueden afectar el contenido de agua del suelo, se recomienda corregir las mediciones de RMP a un contenido similar de agua (Ferrerías *et al.*, 2000) o bien, esperar a realizarlas cuando el contenido de agua del suelo sea uniforme.

En este trabajo, al momento de la determinación de RMP (previo a la siembra) no se registraron diferencias significativas en el contenido de agua del suelo (Figura 3a) hasta los 20 cm de profundidad, por lo que podría considerarse que los resultados obtenidos de RMP no estuvieron influenciados por el contenido de agua.

El análisis estadístico por profundidad de muestreo no detectó interacción entre historia previa y sistema de labranza, ni efectos significativos de la historia previa ( $P > 0,05$ ). Sólo se encontraron efectos significativos ( $P < 0,05$ ) desde los 5 cm hasta los 10 cm debidos al tipo de labranza empleado. Las mayores resistencias se hallaron bajo SD respecto a LC (Figura 6), lo que sería consecuencia de la reconsolidación del suelo debido a la ausencia de laboreos en este sistema de manejo (Soane, 1990; Taboada *et al.*, 2008). En profundidad, los valores de RMP se acercaron al umbral crítico (2 MPa) propuesto por Threadgill (1982), lo que podría dar lugar a la reducción del crecimiento de las raíces (Ehlers *et al.*, 1983; Hamblin, 1985).



**Figura 6**– Resistencia a la penetración (RMP) hasta 20 cm de profundidad para labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). Los asteriscos (\*) indican diferencias significativas entre sistemas de labranza. Las barras horizontales indican el error estándar de la media.

Los resultados obtenidos coinciden con los informados por otros autores (Chagas *et al.*, 1994; Taboada *et al.*, 1998; Vidal; Costa, 2000; Fabrizzi *et al.*, 2005; Álvarez *et al.*, 2009) quienes hallaron mayor resistencia mecánica bajo SD respecto a LC. En el presente estudio, al igual que lo informado por Álvarez *et al.* (2006), la RMP demostró ser más sensible que DAP para indicar diferencias entre sistemas de labranza.

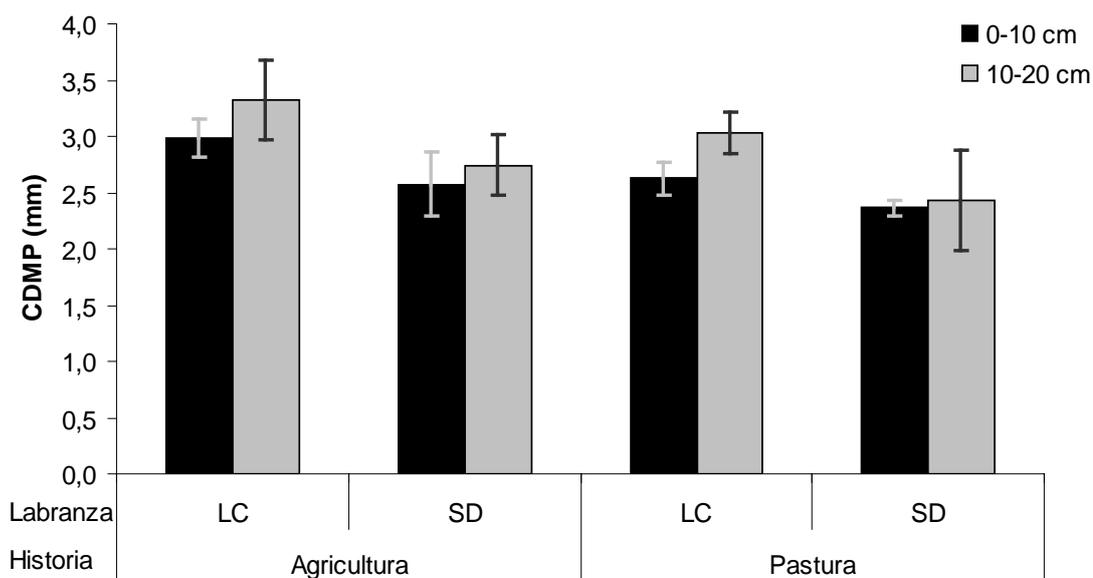
Si bien se han hallado mayores RMP en rotaciones con pasturas respecto a agricultura (Arshad *et al.*, 2004), así como también RMP más elevadas en agricultura continua respecto a la rotación con pasturas (Colombani *et al.*, 2002), en este ensayo no se observaron diferencias significativas entre historias previas. Esta ausencia de efectos significativos se debería al tiempo transcurrido desde la última pastura, ya que luego de 10 años de agricultura continua la posible mejora de la calidad física del suelo al inicio del ensayo debida a la pastura previa, habría desaparecido.

### 3.1.4 Estabilidad de agregados

La EE afecta el desarrollo de las raíces, la capacidad de almacenaje de agua, así como también el movimiento del aire y el agua en el suelo, por lo tanto, repercute sobre los rendimientos de los cultivos (Langmaack, 1999). Numerosos autores mencionan a la EE y al tamaño de agregados como variables sensibles para evidenciar efectos del uso del suelo (Vázquez *et al.*, 1990; Urricariet; Lavado, 1999;

Sanzano *et al.*, 2005; Ferreras *et al.*, 2007). Por esto, la EE es propuesta como un indicador de calidad edáfica y sostenibilidad ambiental (Lal *et al.*, 1994).

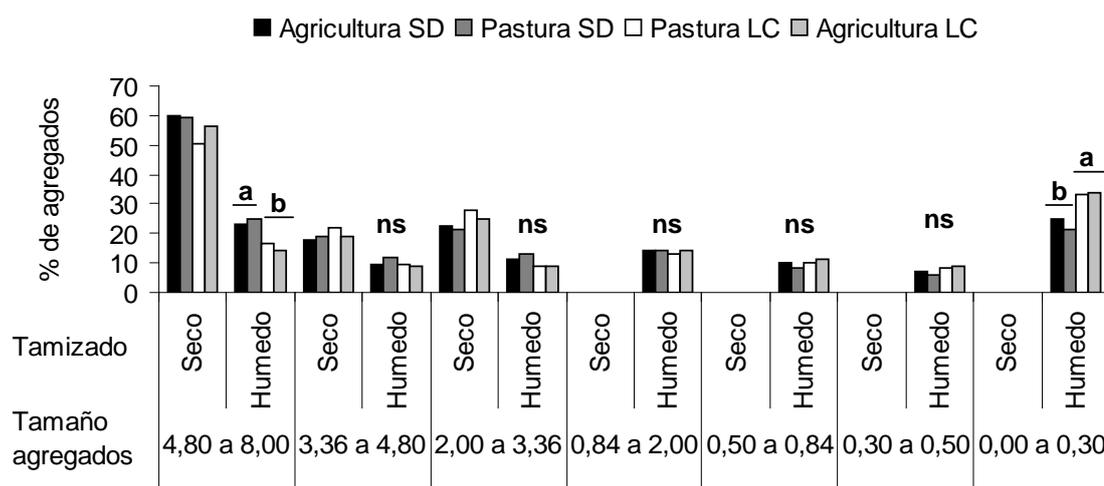
En los primeros 10 cm no se detectaron interacción ni efectos significativos ( $P > 0,05$ ) del sistema de labranza ni de historia previa sobre el CDMP (Figura 7). En tanto, en el estrato de 10-20 cm sólo se detectó efecto principal de labranza ( $P < 0,05$ ), registrándose mayor estabilidad de agregados bajo SD (CDMP= 2,44 mm) respecto a LC (CDMP= 3,17 mm). Estos resultados coinciden con lo hallado por Chagas *et al.* (1994); Eiza *et al.* (2006); Grandy *et al.* (2006); Martínez *et al.* (2008) y Daraghmeh *et al.* (2009). La mayor EE bajo SD es atribuida al hecho de mantener el suelo cubierto por residuos, que protegen a los agregados del impacto de las gotas de lluvia, y a los mayores contenidos de MO bajo este sistema de labranza (Gudelj; Masiero, 2000; Taboada, 2008), considerada uno de los principales agentes que favorecen la agregación del suelo.



**Figura 7-** Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP) en los estratos de 0-10 cm y de 10-20 cm de profundidad, según historia previa (pastura y agricultura) y sistema de labranza (siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)). Las barras indican el error estándar de la media.

De acuerdo con Oades (1984), la presencia y abundancia de macroagregados controlan la resistencia de los suelos a la degradación estructural, y su formación se relaciona con el contenido de MO de rápida tasa de reciclaje. A su vez, la macroagregación depende de la intensidad y de la frecuencia de laboreos, ya que la acción física directa rompe estos agregados y propicia la pérdida de MO al exponer las fracciones protegidas en su interior (Tisdall; Oades, 1982; Six *et al.*, 1999).

La distribución de tamaño de agregados luego del tamizado en seco y en húmedo en la profundidad de 0-20 cm se muestra en la Figura 8. La proporción de agregados mayores (de 4,80 a 8,00 mm) luego del tamizado en agua fue significativamente superior ( $P < 0,05$ ) bajo SD respecto a LC (24,1 y 15,5%, respectivamente), lo que coincide con lo reportado por otros autores (Chagas *et al.*, 1995; Castro Filho *et al.*, 2002; Wright; Hons, 2005), quienes hallaron mayor proporción de macroagregados en superficie bajo SD. Lo contrario ocurrió con la categoría de agregados  $< 0,30$  mm ( $P < 0,05$ ), dado que bajo LC se registró un 33,8 % y bajo SD 23,1%. En tanto, en las clases de tamaño intermedias no se detectaron diferencias estadísticas ( $P > 0,05$ ) entre niveles de los factores analizados. Los resultados obtenidos muestran la mayor estabilidad de la estructura del suelo bajo SD respecto a LC aun ante fuerzas disruptivas de gran magnitud como lo es el tamizado en agua.



**Figura 8** – Proporción de agregados luego del tamizado en seco y en húmedo en el estrato de 0-20 cm en las diferentes clases de tamaño de agregados (mm) para las historias de pastura y agricultura bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). Letras distintas indican diferencias estadísticas entre sistemas de labranza. ns= diferencias no son significativas.

Cabria *et al.* (2002) observaron que bajo LC los macroagregados de gran tamaño colapsaron generando agregados de menores dimensiones y diferente estabilidad, pero que la estabilidad de los macroagregados pequeños y de los microagregados no fue afectada por este sistema de manejo. En forma coincidente con estos autores, bajo LC la redistribución de agregados a tamaños menores ocurrió a expensas de la reducción de macroagregados, ya que al someterlos al tamizado en agua la proporción de agregados mayores de 2 mm se redujo en un 66% respecto al tamizado en seco. En tanto, bajo SD la reducción fue del 58%. Esta mayor disminución en la proporción de macroagregados sería la causa de la menor EE hallada bajo LC respecto a SD. Un

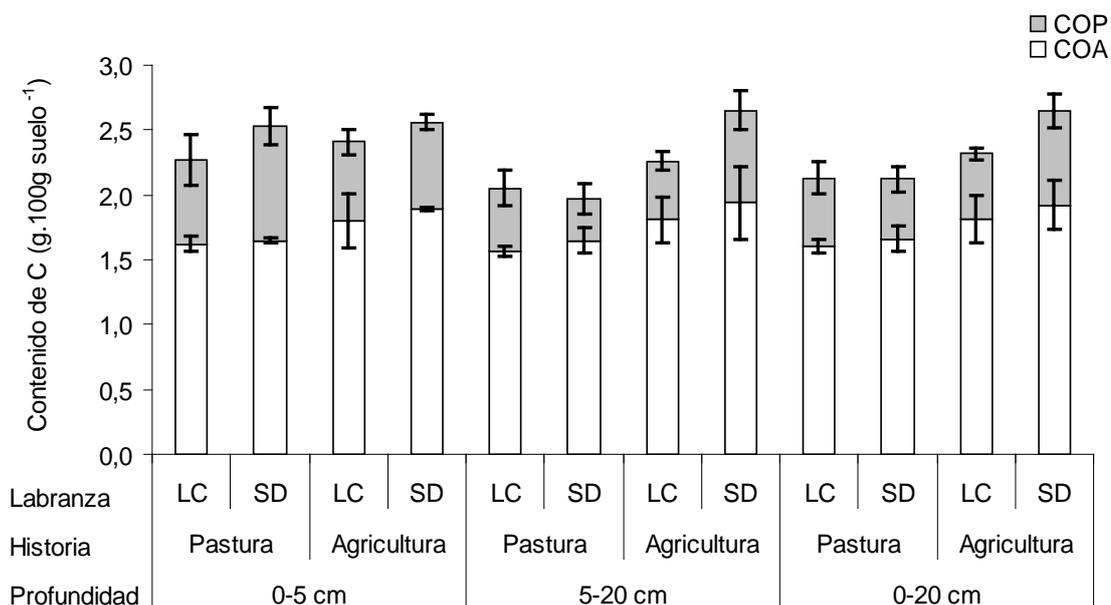
comportamiento similar a LC se observó con historia agrícola, ya que se registró una mayor reducción (62%) de la proporción de agregados mayores a 2 mm cuando el suelo fue sometido al tamizado en agua respecto a historia de pastura (57%).

### 3.1.5 Carbono orgánico

El contenido de MO en un suelo es el resultado del balance entre las tasas de humificación y mineralización (Campbell, 1978). Este balance depende de la cantidad, calidad, oportunidad y mecanismo de retorno de C al suelo a través de los residuos (Robinson *et al.*, 1994), y puede ser manipulado a través de la rotación de cultivos, fertilización y sistemas de labranza (Doran; Smith, 1987; Robinson *et al.*, 1994).

No se detectaron interacción ni efectos significativos de historia previa y del sistema de labranza ( $P > 0,05$ ) para ninguna de las fracciones de carbono (COA, COP, COT) a ninguna de las profundidades de muestreo (Figura 9). Esto coincide con Diovisalvi *et al.* (2008) quienes tampoco observaron diferencias significativas sobre los contenidos de COP, COA y COT, con Puget y Lal (2004) que no hallaron diferencias entre sistemas de labranza en el contenido de COT y con Wander *et al.* (1998), quienes no encontraron diferencias en el contenido de COT ni en el de COP en la capa arable cuando compararon situaciones con 10 años de agricultura bajo LC y SD.

Algunos autores atribuyen la falta de diferencias en el contenido de C entre un suelo laboreado y uno bajo SD a ingresos de carbono y condiciones iniciales semejantes (Álvarez *et al.*, 1998; Andriulo; Cordone, 1998; Urricariet; Lavado, 1999; Domínguez *et al.*, 2009). En este ensayo, el aporte de residuos fue similar en los cuatro tratamientos a través de los 10 años (4226, 3996, 4203 y 4060 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de rastrojo para historia agrícola bajo LC y SD e historia de pastura bajo LC y SD, respectivamente), lo que podría estar explicando la falta de diferencias estadísticas en los contenidos de las fracciones de C entre tratamientos.



**Figura 9** – Contenido de carbono orgánico particulado (COP), asociado a la fracción mineral (COA) y total (COT, COP + COA) para las profundidades 0-5, 5-20 y 0-20 cm (promedio ponderado de las otras dos profundidades) para las historias pastura y agricultura y los dos sistemas de labranza (labranza convencional: LC y siembra directa: SD). Las barras indican el error estándar de la media.

La MO es un componente fundamental del suelo ya que de ella dependen muchas de sus propiedades químicas, físicas y biológicas. Variaciones en su contenido originan cambios en la fertilidad del suelo, en la estabilidad del sistema poroso, en la capacidad de infiltración y de almacenaje de agua (Robinson *et al.*, 1994), y en la susceptibilidad a la compactación de los suelos (Quiroga *et al.*, 1999). De acuerdo con Noellemeyer *et al.* (2005), Álvarez *et al.* (2006) y Aparicio y Costa (2007), existe una relación inversa entre la DAP y el contenido de MO del suelo. En suelos de la región pampeana semiárida, Díaz-Zorita y Grosso (2000) hallaron que al incrementarse el contenido de C, disminuye la compactación de los suelos. Sin embargo, en este trabajo la relación entre DAP y las tres fracciones de C de 0-20 cm no fueron significativas ( $P > 0.05$ ) y sus coeficientes de correlación fueron muy bajos ( $r = 0,20, 0,37$  y  $0,40$  para COP, COA y COT, respectivamente).

Álvarez y Steinbach (2006) citan a la EE en el estrato superficial del suelo como una de las propiedades físicas más afectada por el contenido de MO, ya que sus diferentes fracciones intervienen en la estabilización de los distintos tamaños de agregados. La MO persistente (ácidos húmicos) confiere estabilidad a los microagregados, en tanto que la fracción orgánica temporaria (raíces, hifas de hongos) interviene en la estabilidad de los macroagregados (Tisdall; Oades, 1982). Por su

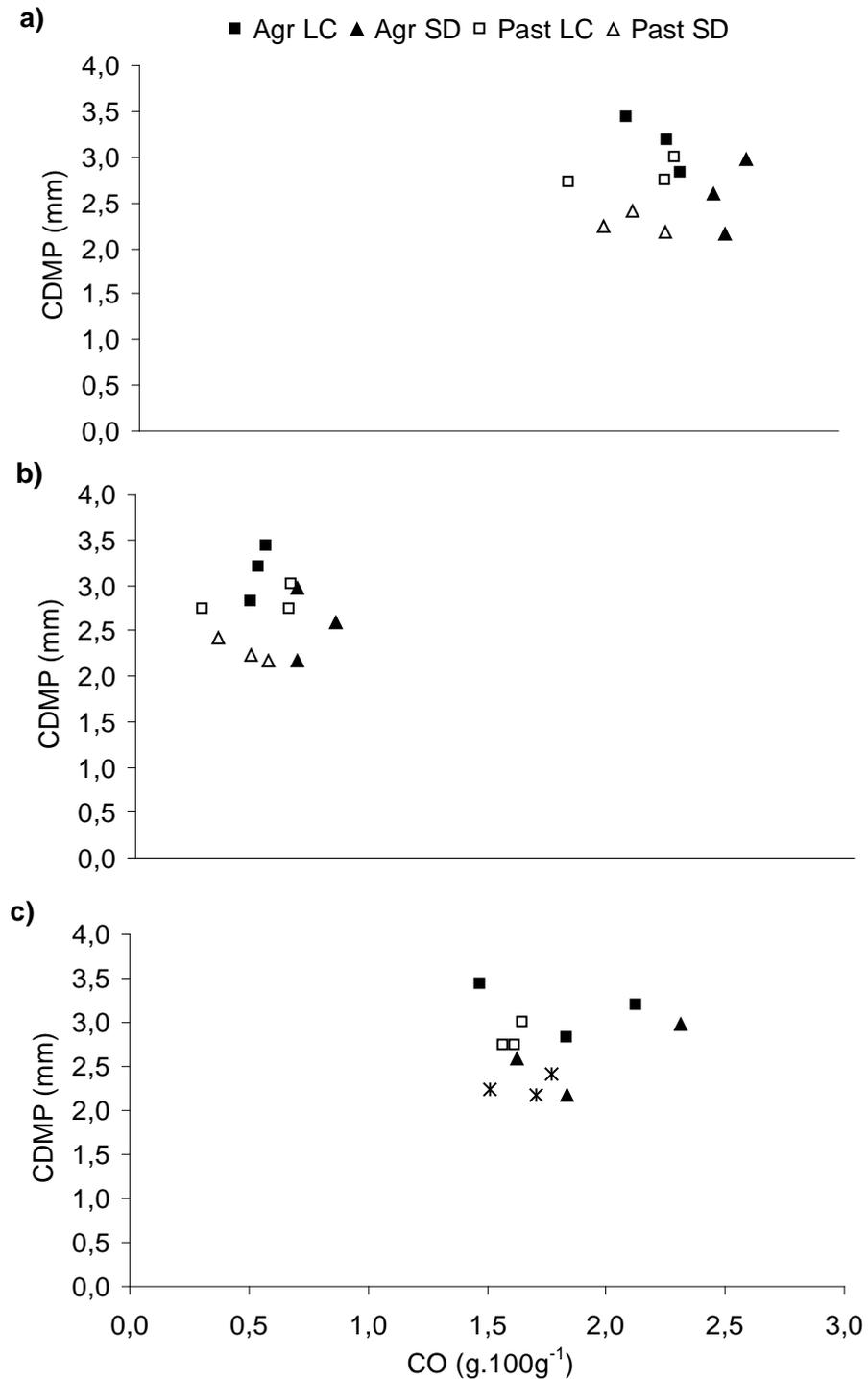
importancia en la protección de la fracción lábil, la proporción de macroagregados estables se considera buena predictora de la respuesta del C a las labranzas (Grandy; Robertson, 2006).

Si bien se ha citado la estrecha relación de la EE con el contenido de COT (Álvarez *et al.*, 2006; Ferreras *et al.*, 2007) así como también con el de COP (Álvarez *et al.*, 2006; Eiza *et al.*, 2006), en este ensayo no se evidenció relación entre CDMP ( $r=0,01$ ;  $0,02$  y  $0,17$  para COT, COP y COA, respectivamente) y el contenido de las diferentes fracciones de C en la profundidad de 0-20 cm (Figura 10a, b y c). Otros autores (Dexter *et al.*, 1984; Aparicio; Costa, 2007) informaron resultados similares, y Aparicio y Costa (2007) lo atribuyeron al limitado rango de contenidos de C y a su elevado nivel en los suelos analizados. Cabe destacar que esta relación dependería del tipo de uso del suelo. En Balcarce, Studdert *et al.* (1997) y Eiza *et al.* (2006) hallaron una relación directa entre EE y contenido de C en sistemas bajo pastura y/o SD, en cambio, bajo agricultura con LC no observaron relación entre esas variables. En tanto, Sanzano *et al.* (2005) informaron que en un Haplustol típico de Tucumán, la EE estuvo relacionada con el nivel de C del suelo bajo LC y SD, pero no hubo relación en el suelo con pastura. Los autores consideran que la estabilidad de agregados en la pastura sería consecuencia de la acción física de las raíces más que de la cantidad de C presente.

### **3.1.6 Contenido de nitrógeno de nitrato**

El contenido de nitrógeno mineral generalmente es menor bajo SD respecto a LC, ya que se reduce la tasa de mineralización, debido a la menor temperatura en el suelo, y se produce una intensa inmovilización por la presencia de una fuente de C de mayor tamaño y durante más tiempo sobre la superficie del suelo (Fox; Bandel, 1986; Sánchez *et al.*, 1998b). También se cita mayor desnitrificación bajo SD por el mayor contenido de agua y la menor remoción del suelo, lo que genera un incremento de la población de microorganismos desnitrificadores (Doran, 1980). Por lo mencionado anteriormente, los requerimientos de fertilización nitrogenada son mayores bajo SD que bajo LC (Meisinger *et al.*, 1985). Por otra parte, se ha informado que periodos bajo pastura incrementan el contenido de C en el suelo, y por lo tanto, aumentan su potencial para entregar N al cultivo siguiente (Studdert *et al.*, 1997).

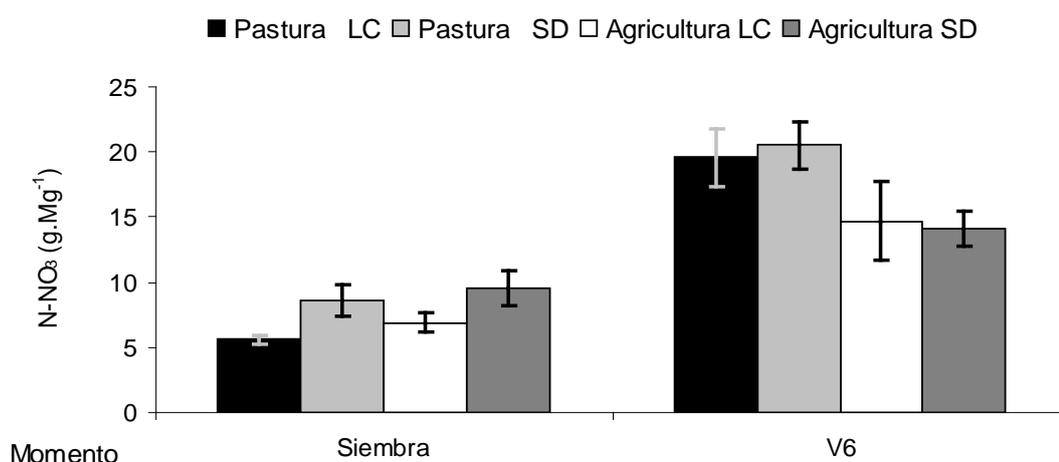
La evaluación del contenido de nitratos presente en el suelo al momento de la siembra del cultivo de maíz es fundamentalmente una medida del nitrato residual y del



**Figura 10-** Relación entre estabilidad estructural, expresada como el cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP), y a) contenido de carbono orgánico total (COT), b) contenido de carbono particulado (COP) y c) contenido de carbono orgánico asociado a la fracción mineral (COA) de 0-20 cm de profundidad bajo siembra directa (SD) y labranza convencional (LC) provenientes de historia agrícola (Agr) y de pastura (Past).

mineralizado durante el barbecho. Por su parte, la determinación en  $V_6$ , por lo general, representa el N mineral presente a la siembra del cultivo, el aporte por mineralización y las pérdidas de N entre la siembra y  $V_6$ , debido a que hasta el estadio de 4 a 5 hojas, la cantidad de N absorbido por el cultivo es muy baja (Echeverría; Sainz Rozas, 2005).

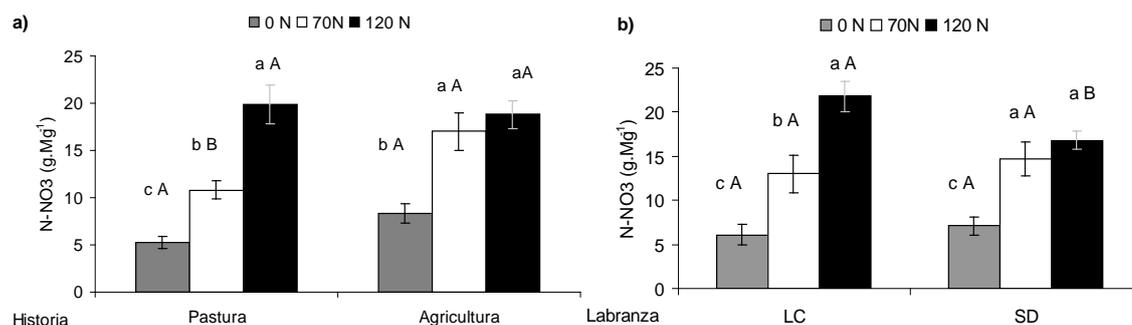
En los muestreos realizados a la siembra del cultivo de maíz y en  $V_6$  (Figura 11) no se detectaron interacción ni diferencias estadísticas ( $P > 0,05$ ) debidas al sistema de labranza (9,08 y 6,30  $\text{g Mg}^{-1}$ , bajo SD y LC, respectivamente) o a la historia previa (8,25 y 7,13  $\text{g Mg}^{-1}$  con historia agrícola y pastura, respectivamente). Los valores hallados en  $V_6$  se encuentran alrededor del umbral de respuesta a la fertilización propuesto por Sainz Rozas *et al.* (2000) para el sudeste de Buenos Aires en condiciones de secano (17  $\text{g Mg}^{-1}$ ). Si bien este umbral fue determinado para la profundidad de 0-30 cm, podría considerarse similar para la profundidad evaluada en este ensayo (0-60 cm), ya que aquellos autores no hallaron una ventaja significativa en la capacidad predictiva del test al muestrear por debajo de los 30 cm



**Figura 11**– Contenido de nitrógeno de nitrato ( $\text{N-NO}_3$ ) a la siembra y en el estadio de seis hojas ( $V_6$ ) de 0-60 cm de profundidad para las dos historias previas (Pastura y Agricultura) bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). Las barras indican el error estándar de la media.

A la madurez del cultivo, el contenido de N-nitrato en el suelo refleja el balance entre lo que se mineralizó desde  $V_6$  y las pérdidas que hubieran ocurrido entre  $V_6$  y madurez, así como también lo aportado por fertilización y lo absorbido por el cultivo, de lo cual una fracción se exporta con el grano, mientras que otra queda en el rastrojo (Maddoni *et al.*, 2003). En este estadio se registraron efectos significativos ( $P < 0,05$ ) de las interacciones “historia x dosis de N” (Figura 12a) y “labranza x dosis de N” (Figura 12b). Se halló mayor contenido de  $\text{N-NO}_3$  en las parcelas fertilizadas con mayor dosis de N, principalmente bajo LC (Figura 12b). Este resultado junto al

relativamente elevado contenido de N-NO<sub>3</sub> residual a madurez en las parcelas sin fertilizar (alrededor de 7 g Mg<sup>-1</sup>), estaría demostrando que las dosis de N aplicadas no se ajustaron a los requerimientos del cultivo, ya que éste, posiblemente por la escasa disponibilidad de agua en la etapa de máxima demanda de este nutriente (prefloración, Figuras 1 y 4a), no absorbió una mayor cantidad de N presente en el suelo.

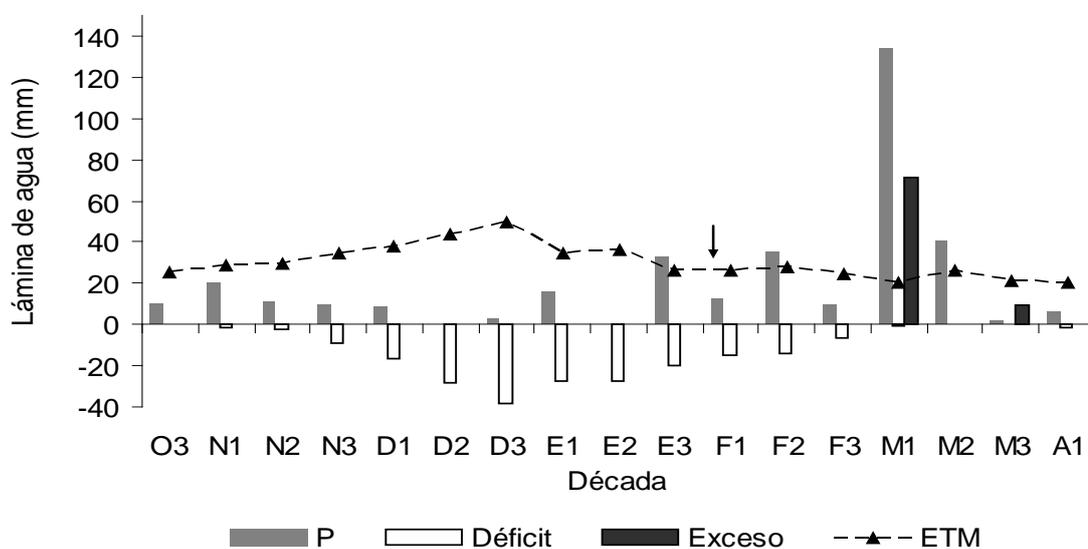


**Figura 12-** Contenido de nitrógeno de nitrato (N-NO<sub>3</sub>) en madurez fisiológica hasta 60 cm de profundidad para a) historia de pastura y agricultura, y b) bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) en las parcelas sin fertilizar (0N), fertilizadas con 70 y con 120 kg N ha<sup>-1</sup> (70N y 120N, respectivamente). Las barras representan el error estándar de la media. Letras minúsculas iguales indican ausencia de diferencias estadísticas ( $P > 0.05$ ) entre dosis de nitrógeno para cada nivel de historia previa (a) o para cada nivel de labranza (b). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias entre historias (a) o sistema de labranza (b) para cada nivel de nitrógeno.

## 3.2 Mediciones en el cultivo de maíz

### 3.2.1 Condiciones meteorológicas durante el ciclo de cultivo

En la Figura 13 se muestran la evapotranspiración máxima, las precipitaciones, los excesos y déficits hídricos ocurridos durante el ciclo del maíz en la campaña 2007-2008. Desde octubre hasta abril las precipitaciones totalizaron 349 mm, registro inferior al promedio histórico (425 mm) para Barrow. En la mayor parte del ciclo se registraron deficiencias hídricas, las que fueron de importancia previo y durante el periodo crítico del cultivo. La campaña agrícola en estudio también se caracterizó por un elevado número de días con heladas. El 15 de noviembre se registró una temperatura de -3,4° C, lo que afectó considerablemente el cultivo, retrasando su crecimiento

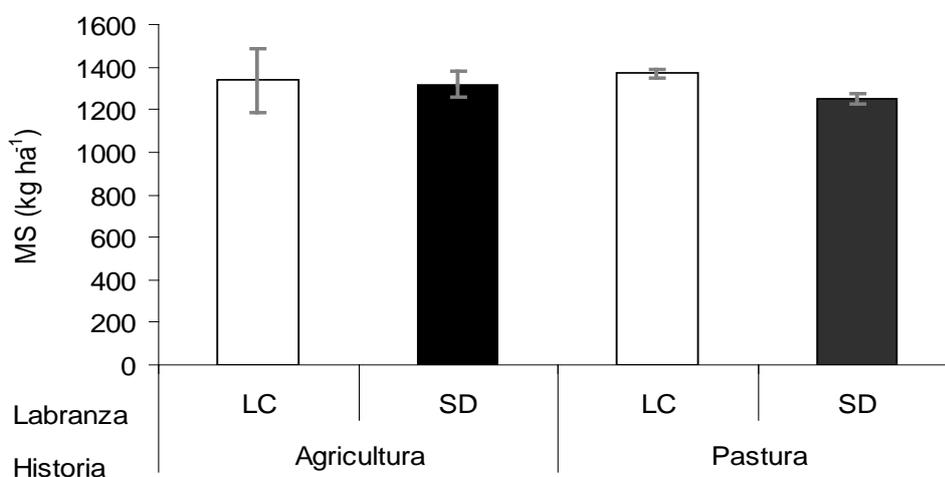


**Figura 13-** Evapotranspiración máxima del cultivo (ETM), precipitaciones (P), déficits y excesos durante el ciclo de maíz en la campaña 2007-2008 (Agrometeorología EEAI Barrow). La flecha indica momento de antesis.

### 3.2.2 Materia seca aérea

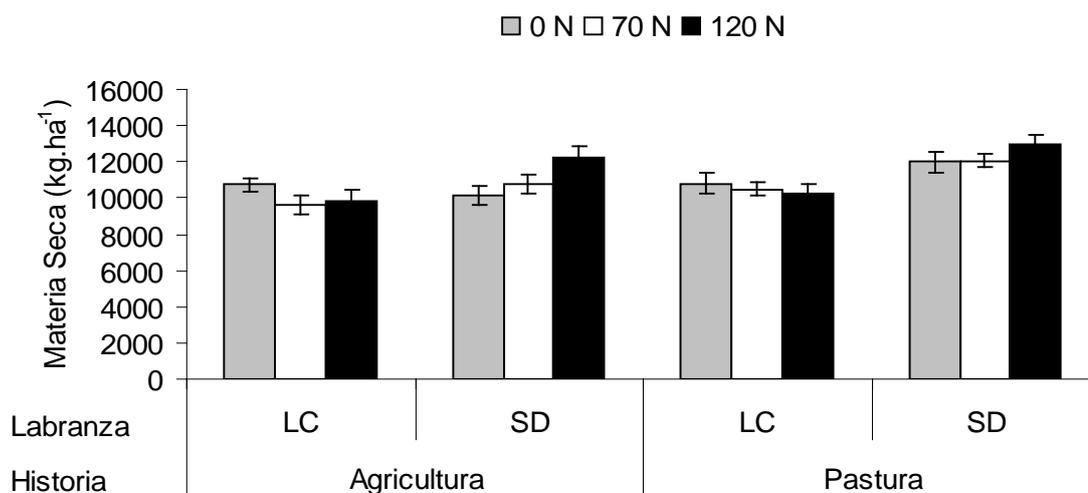
En  $V_6$  no hubo interacción ni efectos significativos ( $P > 0,05$ ) del sistema de labranza ni de historia previa sobre la producción de MS aérea (Figura 14). Este resultado era esperable ya que no se observaron diferencias en la fecha de ocurrencia de los estadios fenológicos del cultivo (emergencia y periodo vegetativo previo a  $V_6$ ) entre tratamientos. Otros autores (Domínguez *et al.*, 2001; Fabrizzi *et al.*, 2005) hallaron una menor producción de MS en etapas iniciales del cultivo bajo SD debido a la menor temperatura del suelo bajo este sistema de labranza, lo que ocasionó un desfase fenológico respecto a LC, pero en el presente estudio este efecto no se manifestó.

En madurez fisiológica ninguna interacción fue significativa ( $P > 0,05$ ). La producción de MS (Figura 15) tampoco fue afectada ( $P > 0,05$ ) por la historia previa ni por el tipo de labranza empleado ni por la aplicación de N, a pesar de que el contenido de  $N-NO_3$  en  $V_6$  (Figura 11) se encontraba en valores cercanos al umbral de respuesta.



**Figura 14** - Producción de materia seca (MS) en el estadio de seis hojas ( $V_6$ ) para labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con historia de agricultura y pastura. Las barras indican el error estándar de la media.

Los resultados obtenidos coinciden parcialmente con los informados por Domínguez *et al.* (2001) quienes no hallaron diferencias significativas entre sistemas de cultivo, pero sí entre dosis de N. La falta de respuesta a la fertilización nitrogenada en el ensayo se contrapone a lo informado por Barbieri *et al.* (2008) para Balcarce, quienes hallaron incrementos en la producción de MS bajo SD al aplicar N. La diferencia entre los resultados obtenidos y los reportados por la literatura puede ser atribuida a que en los últimos, el contenido de agua en el suelo no fue limitante, en tanto que en el presente ensayo hubo déficit durante y previo a antesis (Figura 13).



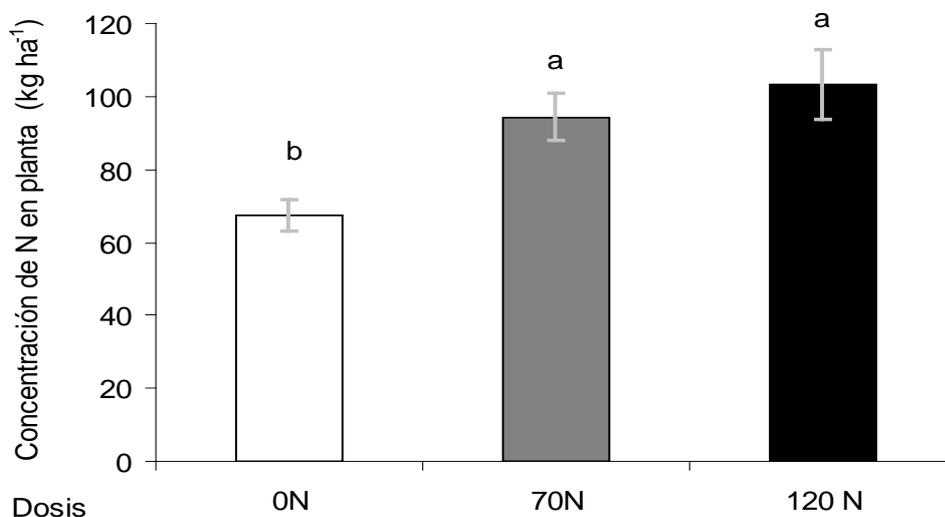
**Figura 15** - Producción de materia seca aérea a madurez fisiológica para las dos historias previas (Agricultura y Pastura), bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con 0, 70 y 120 kg N ha<sup>-1</sup> (0N, 70N y 120N, respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media.

Si bien las diferencias entre sistemas de laboreo no fueron significativas, en general, se observó una tendencia a mayor producción de MS bajo SD respecto a LC, con diferencias que oscilaron entre 1115 y 2660 kg MS ha<sup>-1</sup>. Por otra parte, bajo LC la producción de MS fue ligeramente menor en las parcelas fertilizadas respecto al testigo sin fertilizar. Esto indicaría, como se observó al evaluar el contenido de N-NO<sub>3</sub> en madurez fisiológica (Figura 12), que principalmente la mayor dosis de N, habría resultado excesiva para este sistema de labranza, lo que estaría relacionado con la mayor disponibilidad de este nutriente bajo LC respecto a SD como consecuencia de la mayor mineralización que ocurre con laboreo.

### **3.2.3 Concentración de nitrógeno en planta y en grano**

El N es acumulado en partes vegetativas hasta floración para luego ser removilizado hacia los granos en crecimiento. La tasa de acumulación de este nutriente es máxima entre el estadio V<sub>6</sub> y 15 días después de anthesis (Uhart; Andrade, 1995). Durante el llenado de granos los requerimientos nutricionales de las estructuras reproductivas son cubiertos por la absorción de N durante esta etapa y por la removilización desde estructuras vegetativas (Uhart; Andrade, 1995).

En el presente ensayo no se detectaron interacción ni efectos significativos ( $P > 0,05$ ) de historia previa y del sistema de labranza en la concentración de N en planta, lo que se contrapone con los resultados obtenidos por otros autores (Echeverría; Sainz Rozas, 2001; Aparicio *et al.*, 2002) que reportaron diferencias entre sistemas de labranza. En cambio, se hallaron diferencias estadísticas ( $P < 0,05$ ) entre el testigo y las parcelas fertilizadas (Figura 16), lo que coincide con Domínguez *et al.* (2001), Echeverría y Sainz Rozas (2001) y Barbieri *et al.* (2008).



**Figura 16**– Nitrógeno (N) acumulado en planta en madurez fisiológica para las dosis de 0, 70 y 120 kg N ha<sup>-1</sup> (0N, 70 N y 120N, respectivamente). Letras distintas indican diferencias significativas ( $P < 0,05$ ) entre dosis de nitrógeno.

Por otra parte, no se registró interacción ni se observaron efectos significativos ( $P > 0,05$ ) de historia previa y del sistema de labranza sobre la concentración de N en grano, lo que difiere de lo informado por Meisinger *et al.* (1985) y Echeverría y Sainz Rozas (2001), quienes obtuvieron menor acumulación de N en maíz bajo SD respecto a éste bajo LC. Tampoco hubo diferencias estadísticas ( $P > 0,05$ ) debidas a la fertilización nitrogenada (Tabla 1). Posiblemente la adecuada disponibilidad de agua en el suelo en las etapas iniciales del cultivo (Figura 13) y la posterior deficiencia en floración (Figura 4a y 13), determinaron una mayor caída en la demanda de N que en su oferta, lo que condujo a una reducida respuesta a la fertilización (Uhart; Echeverría, 2002).

**Tabla 1**- Concentración de nitrógeno en grano (g 100g<sup>-1</sup>) para historia agrícola y de pastura bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) sin adición de nitrógeno (0N) y con 70 y 120 kg N ha<sup>-1</sup> (70 N y 120N, respectivamente).

Historia	Agricultura		Pastura	
Labranza	LC	SD	LC	SD
Fertilización	N en grano g 100g <sup>-1</sup>			
0N	1,38	1,51	1,35	1,45
70N	1,50	1,58	1,46	1,54
120N	1,60	1,52	1,50	1,47

En todos los tratamientos los valores registrados fueron superiores a 1,2 % (Tabla 1), concentración crítica de N en grano a cosecha (Uhart; Echeverría, 2002). Sin embargo, el cultivo mostró una baja capacidad de traslocación a grano del nutriente, ya que los índices de cosecha de N obtenidos (ICN,  $\text{kg N ha}^{-1}$  en grano por  $\text{kg N ha}^{-1}$  en biomasa aérea total) fueron del orden de 0,50, valor inferior a los mencionados en la bibliografía (0,60-0,70 Uhart; Andrade, 1995; 0,68 Echeverría *et. al.*, 2005). La adecuada disponibilidad de N durante el llenado de granos habría determinado la menor removilización desde estructuras vegetativas al grano en crecimiento y privilegiado la absorción desde el suelo (Uhart; Andrade, 1995).

### **3.2.4 Rendimiento y componentes**

#### **3.2.4.1 Componentes de rendimiento**

En el cultivo de maíz, el rendimiento puede ser estudiado a través de sus componentes numéricos: el número de granos por unidad de superficie (NG) y su peso individual, no obstante está más asociado con el número final de granos logrados que con el peso de los mismos (Otegui, 1995). El NG es producto del número de plantas por unidad de superficie, del número de espigas granadas por planta y del número de granos por espiga, y queda fijado en un periodo de aproximadamente 30 días alrededor de floración, por lo que se considera a esta etapa como el periodo crítico del maíz (Cárcova *et al.*, 2003). Un estrés hídrico o lumínico durante este periodo provoca las mayores mermas en el NG (Grant *et al.*, 1989; Kiniry; Ritchie, 1985). El peso del grano es función de la duración del periodo de llenado y de la tasa de llenado (Cárcova *et al.*, 2003). Variaciones ambientales durante la fase de llenado efectivo afectan el peso final de los granos. Temperaturas elevadas (mayores a 23°C) originan incrementos en la tasa de llenado que no compensan la disminución del tiempo de llenado (Thompson, 1986).

En ambos componentes de rendimiento se registró interacción ( $P < 0,05$ ) entre sistema de labranza y dosis de N (Tabla 2). Tanto en los testigos sin fertilizar como con la mayor dosis de N, se observó mayor NG y peso de granos (PG) bajo SD respecto a LC ( $P < 0,05$ ). En tanto, cuando se aplicaron  $70 \text{ kg N ha}^{-1}$ , no hubo diferencias en NG ni en PG entre sistemas de labranzas. Si bien se considera que de ambos componentes, el más estable y menos afectado por condiciones ambientales o de manejo es el PG (Andrade; Ferreiro, 1996; Cirilo; Andrade, 1996), bajo SD y LC el PG se incrementó con el agregado de N, mientras que la fertilización no produjo aumento en el NG respecto al testigo.

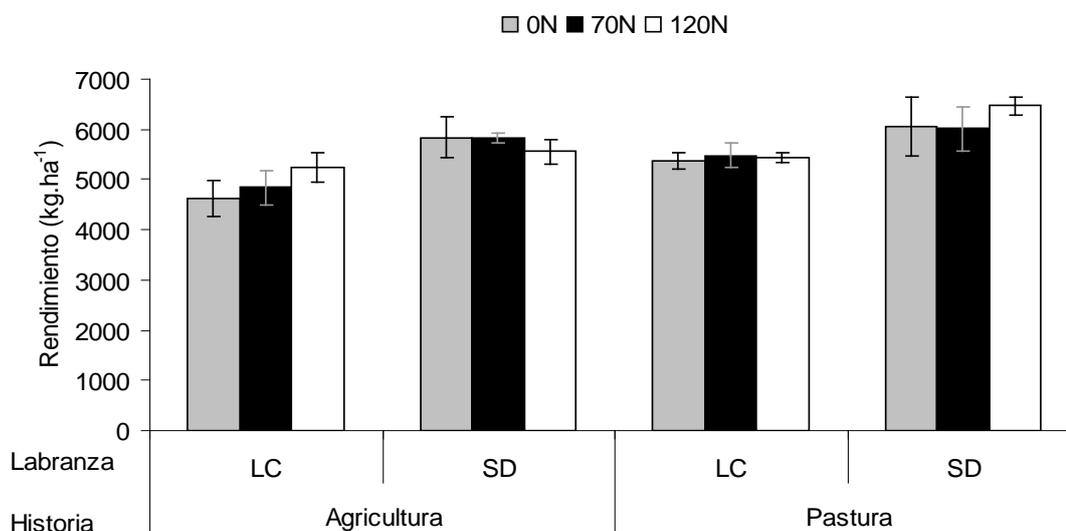
**Tabla 2-** Número de granos (NG) por unidad de superficie y peso individual de los granos bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) para las dosis 0, 70 y 120 kg N ha<sup>-1</sup> (0N, 70N y 120N, respectivamente). Letras minúsculas iguales indican ausencia de diferencias ( $P>0,05$ ) entre dosis de N para cada nivel de sistema de labranza. Letras mayúsculas distintas indican diferencias entre sistemas de labranza para cada nivel de nitrógeno.

Labranzas	Fertilización	NG (granos m <sup>-2</sup> )	Peso grano (mg)
LC	0N	2740 B ab	279 B c
	70N	2927 A a	323 A a
	120N	2738 B b	297 B b
SD	0N	3067 A a	299 A b
	70N	2864 A b	309 A ab
	120N	2987 A ab	315 A a

### 3.2.3.2 Rendimiento

A pesar de haberse encontrado diferencias significativas en los componentes de rendimiento, no se registraron interacción significativa ni diferencias estadísticas ( $P>0,05$ ) del sistema de labranza, fertilización ni historia previa (Figura 17) sobre el rendimiento de maíz.

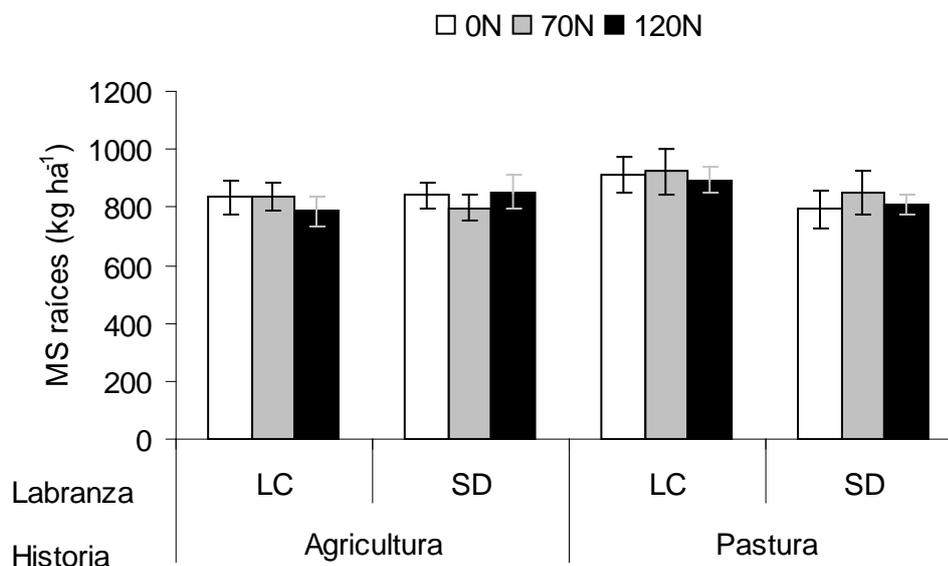
Los resultados de este ensayo coinciden con lo informado por Aparicio *et al.* (2002), quienes no encontraron diferencias significativas en rendimiento de maíz entre dosis de fertilizante así como tampoco entre sistemas de labranzas, y parcialmente con Domínguez *et al.* (2009), ya que estos autores no hallaron diferencias estadísticas entre labranzas, pero sí observaron mayores rendimientos con la aplicación de N. Por el contrario, Echeverría y Sainz Rozas (2001) y Fabrizzi *et al.* (2005) obtuvieron mayores rendimientos de maíz bajo LC respecto a SD cuando el cultivo no fue fertilizado, y no detectaron diferencias cuando se aplicó N.



**Figura 17-** Rendimientos de maíz para las historias previas (pastura y agricultura), bajo los dos sistemas de labranza (siembra directa (SD) y labranza convencional (LC)) con 0, 70 y 120 kg ha<sup>-1</sup> (0N, 70N y 120N, respectivamente). Las barras indican el error estándar.

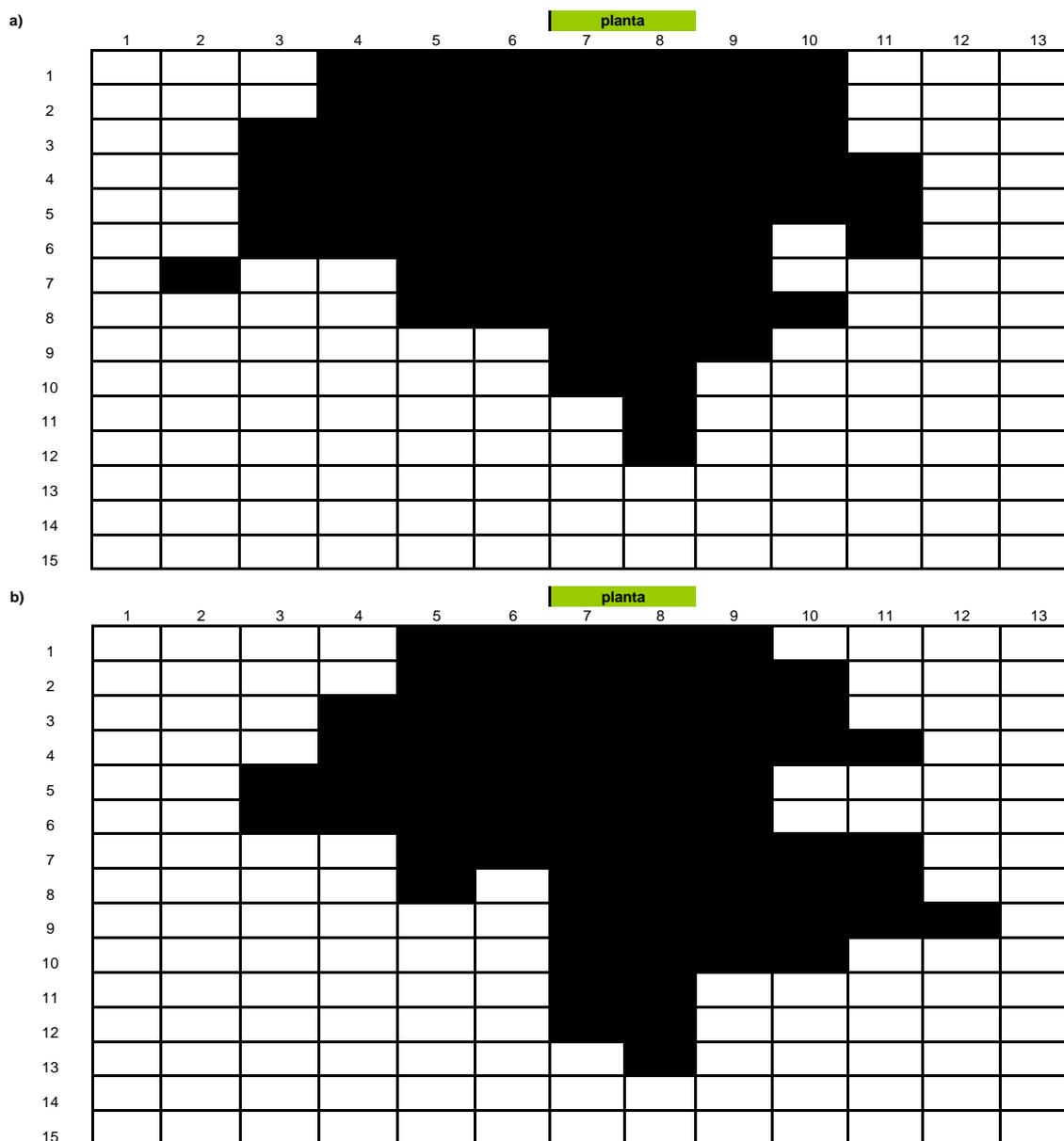
La falta de respuesta significativa a la fertilización nitrogenada en este ensayo podría deberse al estrés hídrico sufrido durante gran parte del ciclo de cultivo (Figura 13), lo que se opone a lo informado por Rizzalli (1998) quien observó mayores rendimientos bajo SD cuando se fertilizó con N en un año seco. Esta diferencia en los resultados hallados podría deberse a que este autor trabajó en suelos de Balcarce, en los cuales, a diferencia de lo registrado en este trabajo (Figura 3), se observaron distintos contenidos de agua del suelo entre sistemas de labranza.

La presencia de capas compactadas afecta negativamente el crecimiento radical y el rendimiento de los cultivos (Díaz Zorita *et al.*, 2002; Abu-Hamdeh, 2003). De acuerdo con Maddonni *et al.* (1999), el maíz es uno de los cultivos más susceptibles a la compactación. Se ha citado que ante una impedancia mecánica las raíces del cultivo de maíz tienden a acumularse en la zona superficial del suelo y que se reduce el crecimiento de las mismas (Taboada *et al.*, 2008), sin embargo, en el ensayo no se observaron diferencias ( $P > 0,05$ ) entre sistemas de labranza en la producción de materia seca de raíces (Figura 18), así como tampoco cuando se evaluó la distribución del sistema radical al final del ciclo de cultivo en una parcela bajo LC y en otra bajo SD (Figura 19a y b). Es decir, que a pesar de haber obtenido valores de RMP y DAP en profundidad cercanos a los umbrales críticos citados en la bibliografía, éstos no habrían sido perjudiciales para el crecimiento de las raíces del maíz.



**Figura 18-** Materia seca (MS) de raíces para las dos historias previas (Agricultura y Pastura) bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con 0, 70 y 120 kg N ha<sup>-1</sup> (0N, 70N y 120N, respectivamente). Las barras indican el error estándar de la media.

También se cita que menores CDMP de los agregados se asocian con mayores rendimientos de maíz (Urricariet; Lavado, 1999), debido a que la mayor EE mejora la exploración de la raíces y, por lo tanto, su eficiencia para absorber agua y nutrientes. No obstante, en el presente ensayo no se observó relación entre los rendimientos con las tres dosis de N y las variables edáficas DAP ( $r = 0,32$ ,  $n=36$ ), RMP ( $r = 0,26$ ,  $n=36$ ) y CDMP ( $r = 0,32$ ,  $n=36$ ) de 0-20 cm. Por lo tanto, debido a que no se halló relación entre el rendimiento y las propiedades físicas del suelo y que de acuerdo al contenido de N-NO<sub>3</sub> remanente en el suelo a madurez (Figura 12), el N no fue limitante, podría considerarse que el déficit hídrico sufrido durante gran parte del ciclo del cultivo (Figura 13), y principalmente durante el periodo crítico, fue el factor que limitó la productividad del maíz en la campaña 2007-2008. Otegui *et al.* (1995) hallaron que el rendimiento de maíz se asoció directamente con el consumo de agua en floración en situaciones de deficiencias hídricas moderadas, registrando incrementos de 18 kg de grano ha<sup>-1</sup> por milímetro de agua adicional consumida en esa etapa.



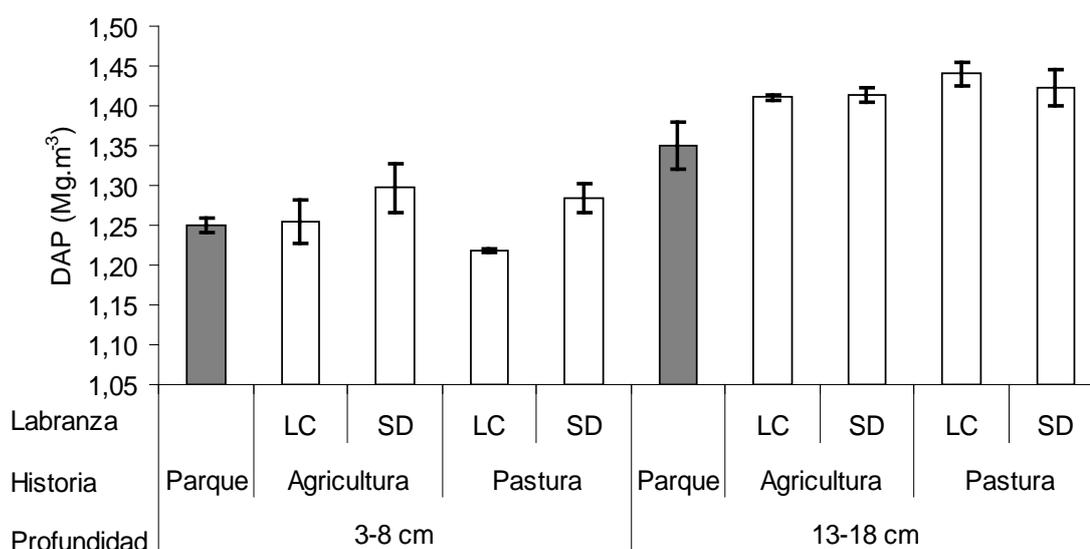
**Figura 19-** Distribución de raíces de maíz (ausencia □ y presencia ■) a cosecha en una parcela bajo a) siembra directa (SD) y en otra b) bajo labranza convencional (LC) en los primeros 30 cm de profundidad.

### **3.3 Comparación con la situación sin disturbar**

#### **3.3.1 Densidad aparente**

No se detectaron diferencias significativas ( $P > 0,05$ ) al efectuar contrastes ortogonales entre la condición sin disturbar y cada una de las combinaciones “historia previa x sistema de labranza”, a ninguna de las profundidades evaluadas (el contenido de agua en el parque en el momento de muestreo hasta los 20 cm de profundidad fue  $0,24 \text{ g g}^{-1}$ , valor similar a los registrados en los tratamientos (Figura 3a)). Sin embargo, en general, los tratamientos mostraron una tendencia a mayor densificación que el

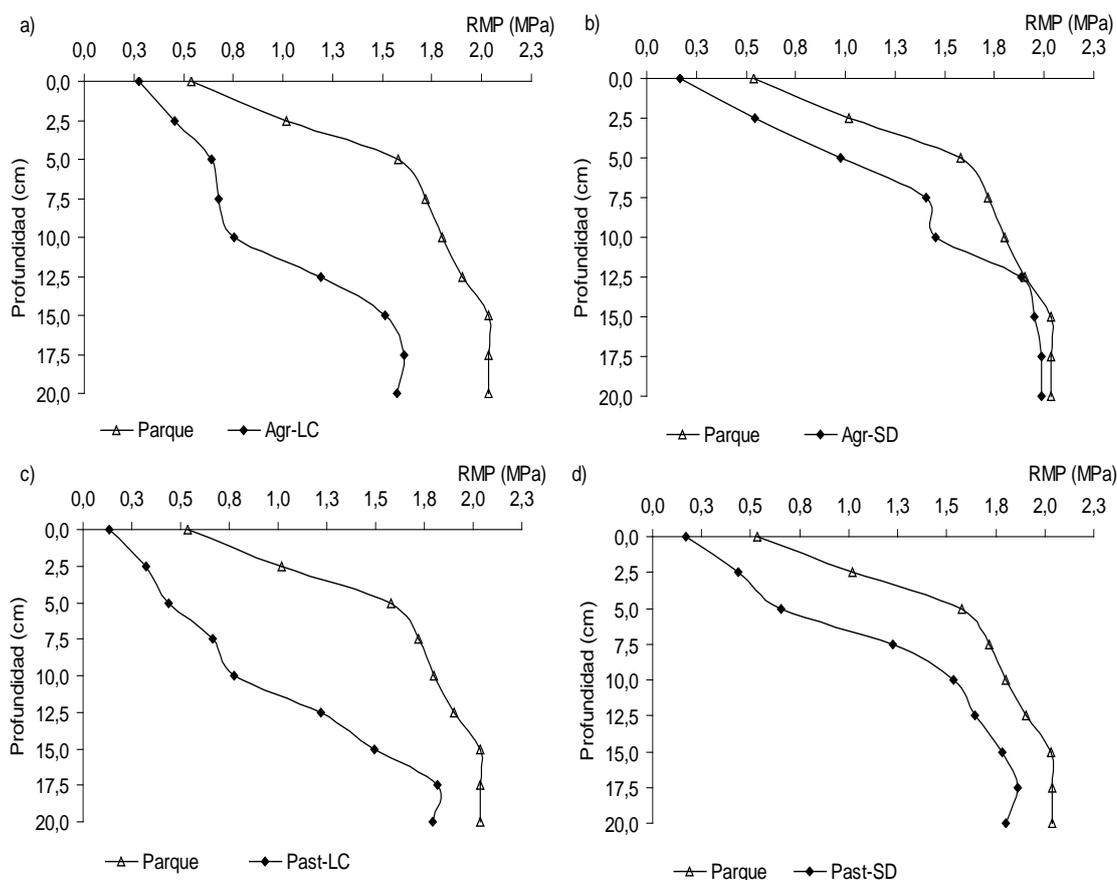
parque, principalmente en la capa de 13-18 cm (Figura 20), lo que se debería al efecto acumulado del tránsito de maquinaria agrícola en los suelos cultivados (Pidgeon; Soane, 1977; Botta *et al.*, 2008). Por otra parte, el continuo crecimiento y muerte de las raíces de la vegetación presente en el parque, asociado con el incremento en la biomasa microbiana y con la producción de sustancias ligantes de las partículas de suelo (Tisdall; Oades, 1982), permitiría incrementar la agregación y la porosidad (Robinson *et al.*, 1994), lo que se traduciría en una menor DAP.



**Figura 20**– Densidad aparente (DAP) en los estratos 3-8 cm y 13-18 cm para las historias previas Agricultura y Pastura bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) y la situación sin disturbar (Parque). Las barras indican el error estándar de la media.

### 3.3.2 Resistencia mecánica a la penetración

Los tratamientos bajo LC, tanto provenientes de agricultura continua como de pastura, presentaron menor RMP ( $P < 0,05$ ) que la condición sin disturbar hasta los 15 cm (Figuras 21a y c), y se observó un incremento de la compactación por debajo de la profundidad habitual de laboreo. En cambio, SD presentó un patrón similar al del parque (Figuras b y d), aunque con historia de pastura difirió ( $P < 0,05$ ) hasta los primeros 7,5 cm y con historia agrícola, hasta los 10 cm de profundidad. Esta mayor similitud en los valores de RMP entre la condición no disturbada y SD estaría asociada a la falta de remoción del suelo por un tiempo prolongado en ambas condiciones (Taboada *et al.*, 2008). Cabe destacar que el contenido de agua en el parque en los primeros 20 cm ( $0,21 \text{ g g}^{-1}$ ) fue similar a los registrados para el ensayo (Figura 3a), por lo cual, no sería la causa de las diferencias encontradas.



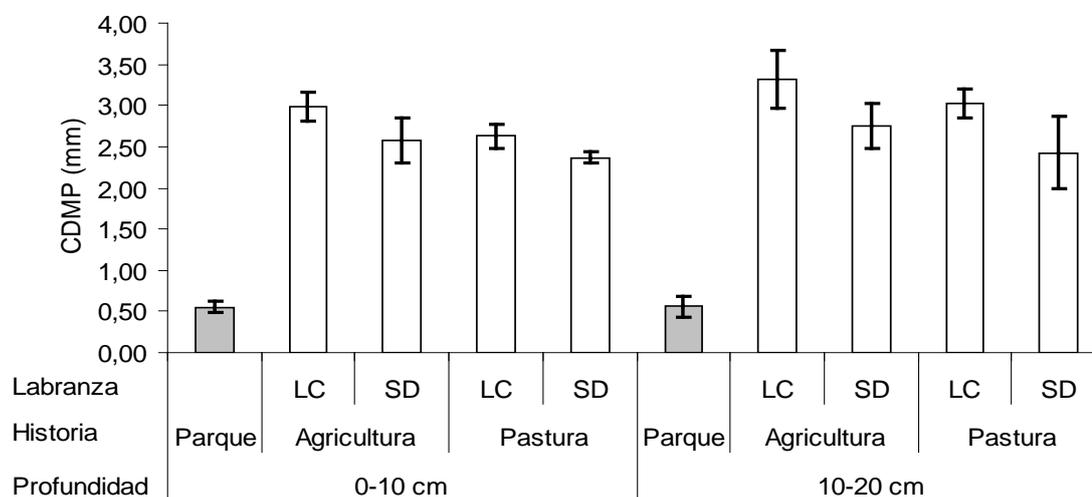
**Figura 21**– Resistencia mecánica a la penetración (RMP) hasta los 20 cm de profundidad a intervalos de 2,5 cm para a) historia agrícola bajo LC (Agr-LC), b) historia agrícola bajo SD (Agr-SD), c) historia de pastura bajo LC (Past-LC) y d) historia de pastura bajo SD (Past-SD) en comparación con la situación sin disturbar (Parque).

### 3.3.3 Estabilidad de agregados

El CDMP de los agregados del parque fue menor ( $P < 0,05$ ) en comparación con los 4 tratamientos en ambas profundidades de muestreo (Figura 22). Asimismo, la proporción de agregados mayores que 2 mm luego del tamizado en húmedo, fue superior ( $P < 0,05$ ) en la condición sin disturbar (87% y 88% de 0-10 cm y 10-20 cm, respectivamente), en comparación con la hallada en el ensayo (Figura 8).

Si bien con el empleo del sistema conservacionista se observó una tendencia a mayor EE respecto a LC (Figuras 7 y 22), 10 años bajo SD no fueron suficientes para igualar la condición considerada prístina para este suelo. La mayor estabilidad de agregados en el sitio sin disturbar respecto a las situaciones alteradas coincide con lo hallado por otros autores (Elliott, 1986; Sánchez *et al.*, 1998a; Gudelj; Maseiro, 2000; Carrasco *et al.*, 2008). Este resultado estaría asociado a la ausencia de remoción del suelo por labores mecánicas, a la acción física de las raíces de las gramíneas

presentes en el parque y a la liberación de mucilagos que favorecen la estabilización de agregados (Perfect *et al.*, 1990; Lavelle *et al.*, 1997).

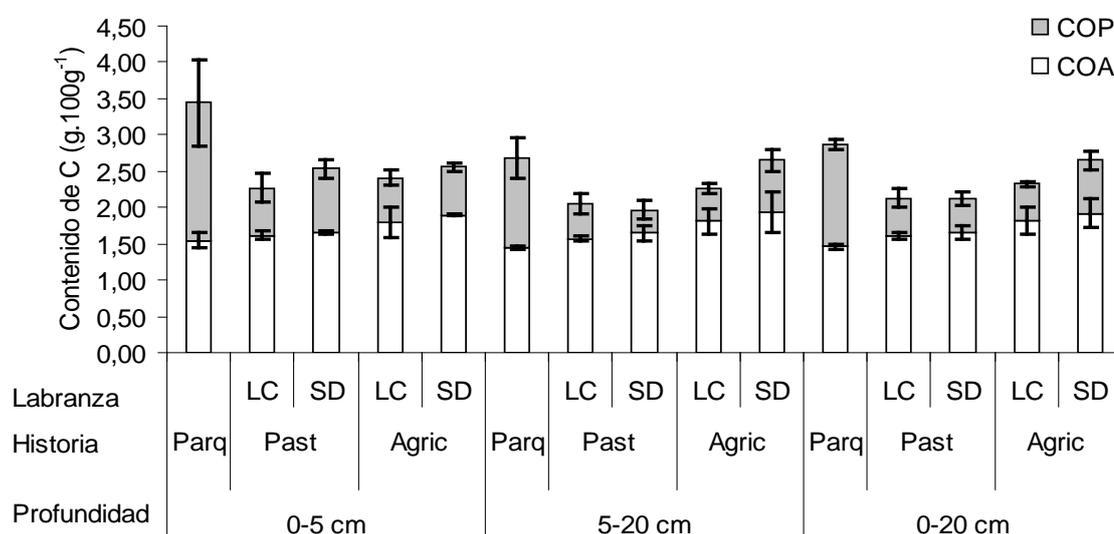


**Figura 22**– Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP) en la situación sin disturbar (Parque) y para ambas historias previas (Agricultura y Pastura) bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) en las profundidades 0-10 cm y 10-20 cm. Las barras indican el error estándar de la media.

### 3.3.4 Carbono orgánico

El contenido de COP en los 3 estratos considerados fue superior ( $P < 0,05$ ) en la situación sin disturbar (Figura 23) respecto a los tratamientos. En cambio, el COA en el parque difirió ( $P < 0,05$ ) únicamente del tratamiento bajo SD con historia agrícola en las profundidades 5-20 cm y 0-20 cm. Este resultado coincide con lo esperado, ya que el COA es una fracción de baja labilidad, por lo que no deberían existir grandes diferencias entre prácticas de manejo (Cambardella; Elliot, 1992; Domínguez *et al.*, 2009). En los primeros 5 cm, SD con historia agrícola presentó valores de COT similares a los registrados en el parque ( $P > 0,05$ ), en tanto, en el resto de los tratamientos se observó una menor concentración que en aquél ( $P < 0,05$ ). En la capa de 5-20 cm, el contenido de COT en la condición sin disturbar fue mayor ( $P < 0,05$ ) que en LC y SD provenientes de historia de pastura, y no difirió ( $P > 0,05$ ) de ambos sistemas de labranza con historia agrícola. En el estrato de 0-20 cm, el COT fue significativamente mayor en la condición no disturbada respecto a los tratamientos, observándose un 24% y un 19% menos C bajo LC y SD respectivamente, en comparación con el parque. Dantur *et al.* (1989) y García *et al.* (1993) también citaron menores contenidos de COT en suelos agrícolas respecto a situaciones prístinas. Sanzano *et al.* (2005) informaron una reducción del 25% del nivel de C bajo SD y del

34% bajo LC respecto a una situación sin disturbar en la Llanura Chacopampeana seca subhúmeda de la provincia de Tucumán, luego de 20 años de agricultura.



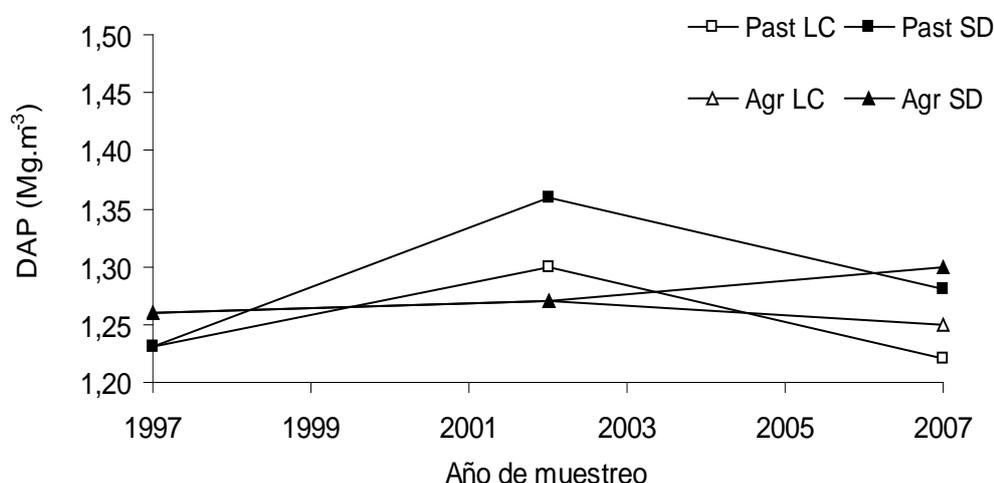
**Figura 23-** Contenido de carbono orgánico particulado (COP), asociado a la fracción mineral (COA) y total (COT) en las profundidades 0-5, 5-20 y 0-20 cm para la situación sin disturbar (Parq) y para las historias pastura (Past) y agricultura (Agric) y los dos sistemas de labranza (labranza convencional: LC y siembra directa: SD). Las barras indican el error estándar de la media.

Las diferencias más notorias entre la condición disturbada y el parque se presentan en los niveles de COP (Figura 23). El mayor contenido de la fracción lábil en el parque (en promedio para los 3 estratos, el COP representó alrededor del 50% del COT) obedecería a la ausencia de remoción del suelo, lo que origina una tasa de mineralización más lenta (Bayer *et al.*, 2006), por el mayor y más continuo aporte de biomasa aérea y radical (Tisdall; Oades, 1982) y por la distribución de precursores de MO que dejan las raíces de las gramíneas que crecen en él. Este resultado muestra la mayor sensibilidad del COP para distinguir distintas situaciones de manejo (Franzluebbers *et al.*, 1999; Fabrizzi *et al.*, 2003; Eiza *et al.*, 2006). Por otra parte, la fracción particulada es considerada como la que más contribuye al mantenimiento de la EE (Stevenson; Cole, 1999), por lo que posiblemente, el mayor contenido de COP habría permitido contar con una mayor proporción de macroagregados y una mayor EE (Figura 22) en la condición sin disturbar respecto a los suelos laboreados.

### **3.4 Evolución de variables edáficas en el tiempo**

#### **3.4.1 Densidad aparente**

Al inicio del ensayo, en el primer estrato (Figura 24), los valores de DAP fueron 1,26 y 1,23 Mg m<sup>-3</sup> para la historia agrícola e historia de pastura, respectivamente. Cuando se evaluó la evolución de la DAP en la profundidad de 3-8 cm, se halló interacción año x historia y diferencias entre los sistemas de labranza ( $P < 0,05$ ). En 2002, la historia de pastura registró mayor DAP (1,33 Mg m<sup>-3</sup>) que la agrícola (1,27 Mg m<sup>-3</sup>). En tanto, en 2007 las historias no difirieron entre sí (1,25 y 1,28 Mg m<sup>-3</sup> para pastura y agricultura, respectivamente).



**Figura 24-** Evolución de la densidad aparente (DAP) de 3-8 cm luego de 10 años de iniciado el ensayo para los tratamientos con historia de pastura y agricultura bajo siembra directa (Past SD y Agr SD, respectivamente) y labranza convencional (Past LC y Agr LC, respectivamente).

Las parcelas provenientes de pastura presentaron mayor densificación ( $P < 0,05$ ) en 2002 que en 2007, en cambio, aquéllas con historia agrícola no difirieron entre años ( $P > 0,05$ ). Cabe mencionar que no se esperaba el comportamiento presentado por historia de pastura en el año 2002. Este podría deberse al efecto del tránsito reciente con maquinaria o a algún inconveniente en el muestreo o en el procesamiento de las muestras, cuya existencia o no, no fue posible de identificar. Sin embargo, al igual que en 2007, la determinación se realizó en julio sobre rastrojo de trigo con contenido de agua similar (Tabla 3), por lo que las parcelas no habrían presentado efectos del paso reciente de maquinaria.

Respecto a los sistemas de labranza, en la profundidad de 3-8 cm (Figura 24), se observó mayor DAP ( $P < 0,05$ ) bajo SD en comparación con LC (1,30 y 1,26 Mg m<sup>-3</sup>,

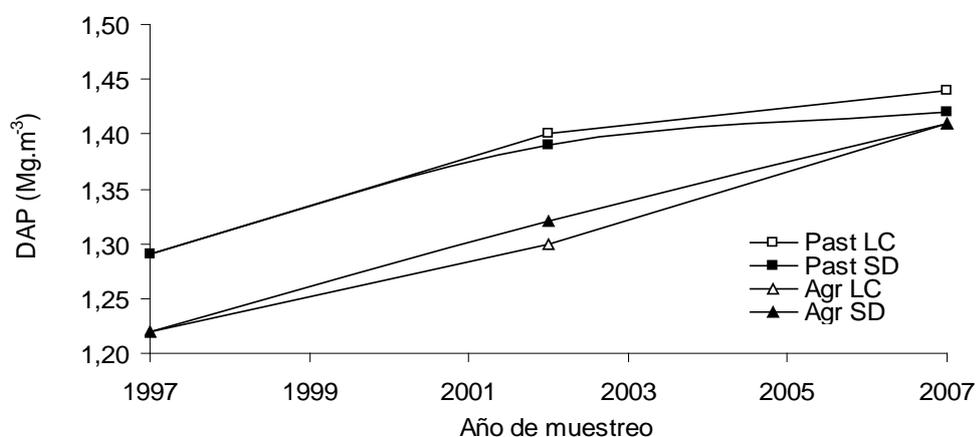
respectivamente). Esto sería consecuencia de la falta de remoción del suelo por varios años y del tráfico de las maquinarias (Botta *et al.*, 2004).

**Tabla 3-** Contenido de agua en los tres años de muestreo de 0-20 cm para historia agrícola y pastura bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD). En 1997 se presentan los datos para cada historia previa.

Años	Agricultura		Pastura	
	LC	SD	LC	SD
	-----Contenido de agua (g g <sup>-1</sup> )-----			
<b>1997</b>	0,26		0,24	
<b>2002</b>	0,22	0,23	0,22	0,24
<b>2007</b>	0,24	0,23	0,22	0,23

A diferencia de lo hallado en este ensayo, Dardanelli y Gil (1997) y So *et al.* (2008) observaron que luego de más de 10 años de implementada la SD, la DAP disminuyó significativamente. Según estos autores, este hecho podría deberse a la mejora de la porosidad por no ser alterada su geometría por el laboreo, al incremento del contenido de MO y a la mayor actividad biológica bajo SD.

En 1997, en el estrato de 13-18 cm (Figura 25) la DAP en las parcelas con historia de pastura fue 1,29 Mg m<sup>-3</sup>, y en aquellas con historia agrícola, 1,22 Mg m<sup>-3</sup>. Al analizar la DAP a través de los años según historia previa y sistema de labranza, se registraron diferencias estadísticas entre años y entre historias (P<0,05) y no se detectaron efectos del sistema de labranza (P>0,05). En 2007 se observó un incremento de la DAP respecto al muestreo anterior (1,42 y 1,35 Mg m<sup>-3</sup> en 2007 y 2002, respectivamente) e historia de pastura presentó mayor densificación que historia agrícola (1,41 y 1,36 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente). Con el paso de los años se observa tendencia al incremento de la DAP en los 4 tratamientos, y éste parece ser más marcado en las parcelas con historia agrícola respecto al valor inicial (1997). Si bien la mayor DAP registrada se encuentra por debajo de los umbrales citados como críticos para el crecimiento de las raíces (Vehimeyer; Hendrickson, 1948; Griffith *et al.*, 1977), en caso de continuar la tendencia creciente observada luego de 10 años, podrían presentarse problemas para el crecimiento inicial de los cultivos.

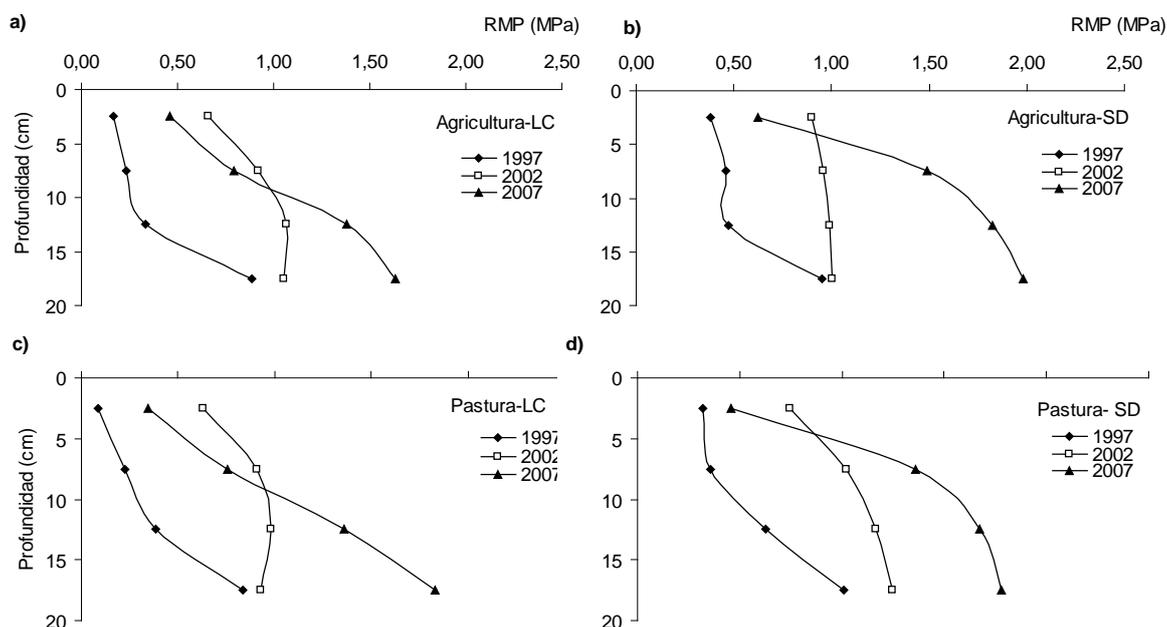


**Figura 25-** Evolución de la densidad aparente (DAP) luego de 10 años de iniciado el ensayo de 13-18 cm para los tratamientos con historia de pastura y agricultura bajo siembra directa (Past SD y Agr SD, respectivamente) y labranza convencional (Past LC y Agr LC, respectivamente).

### 3.4.2 Resistencia mecánica a la penetración

En la Figura 26 se presenta la evolución de la RMP con historia agrícola bajo LC y SD e historia de pastura bajo LC y SD. Al inicio del ensayo las parcelas provenientes de agricultura presentaron resistencias levemente superiores respecto a historia de pastura hasta los 10 cm de profundidad, y a mayor profundidad los valores tendieron a igualarse.

Al comparar los muestreos posteriores, en los primeros 5 cm no se detectaron interacciones ( $P > 0,05$ ), pero sí efectos significativos ( $P < 0,05$ ) de año, historia previa y sistema de labranza (Figura 26). Se registró mayor RMP en el año 2002 (0,77 MPa) respecto a 2007 (0,50 MPa), en historia agrícola (0,79 MPa) en comparación con pastura (0,49 MPa) y bajo SD (0,72 MPa) respecto a LC (0,56 MPa).



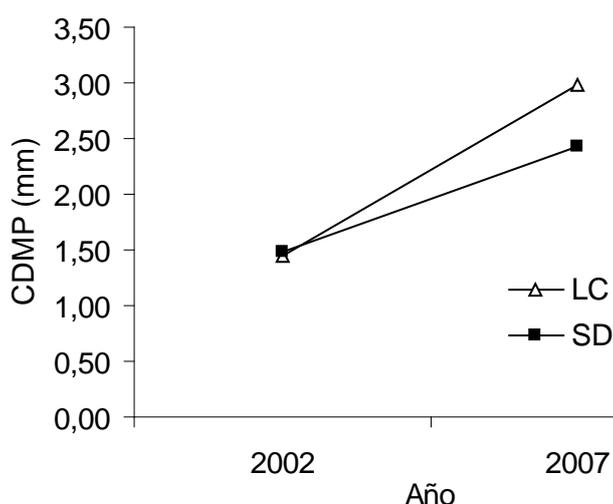
**Figura 26**– Evolución de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) hasta los 20 cm de profundidad en los 3 años de muestreo (1997, 2002 y 2007) para a) historia agrícola bajo labranza convencional y b) siembra directa y c) para historia de pastura bajo labranza convencional y d) bajo siembra directa.

A los 10 cm hubo interacción significativa “año x sistema de labranza” y efecto de historia previa ( $P < 0,05$ ). Las parcelas con historia de pastura presentaron menor resistencia que aquéllas con historia agrícola (0,83 y 1,12 MPa, respectivamente). Por otro lado, en el año 2002 las parcelas bajo SD (0,94 MPa) no difirieron de las parcelas bajo LC (0,86), mientras que en 2007, bajo SD se registró mayor RMP respecto a LC (1,37 y 0,72 MPa, respectivamente). Bajo SD, los valores obtenidos en 2002 fueron estadísticamente menores que los registrados en 2007. En cambio, bajo LC fueron significativamente mayores que los registrados en el último año de muestreo. A los 20 cm sólo se registraron diferencias significativas entre años de muestreo ( $P < 0,05$ ). En 2007 hubo un incremento en resistencia respecto a 2002 (1,80 y 1,05 MPa en 2007 y 2002, respectivamente)

El aumento de RMP en profundidad a través de los años coincide con lo hallado para DAP de 13-18 cm, lo que evidenciaría un incremento de la compactación al aumentar el número de años bajo agricultura asociado con efectos acumulados del tránsito de maquinarias y con las operaciones de laboreo a la misma profundidad (Botta *et al.*, 2008; Botta *et al.*, 2009). Por otra parte, la ausencia de remoción (Krüger, 1996) durante 10 años bajo SD sería la causa de la mayor compactación presente a menor profundidad respecto a los tratamientos con labranza (Figura 26b y d).

### 3.4.2 Estabilidad de agregados

En 1997 el CDMP en las parcelas provenientes de pastura fue 1,16 mm y en aquéllas con historia agrícola, 1,43 mm. Esto se debería a la ausencia de remoción del suelo y al mayor aporte de C desde la biomasa aérea y radical en la pastura durante los 4 años previos.



**Figura 27-** Cambio en el diámetro medio ponderado de los agregados (CDMP) de 0-20 cm bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) en los años de muestreo 2002 y 2007.

Cuando se analizó la evolución del CDMP de 0-20 cm, se detectó interacción “año x labranza” ( $P < 0,05$ ). En 2007, tanto LC (2,97 mm) como SD (2,37 mm), presentaron menor EE que en 2002 (1,42 mm para ambos sistemas de labranza). Labranza convencional no presentó diferencias ( $P > 0,05$ ) con SD en 2002, sin embargo, en 2007 el CDMP fue mayor ( $P < 0,05$ ) que en el sistema conservacionista (Figura 27). Este resultado coincide con Micucci y Taboada (2006), quienes informaron que luego de un periodo prolongado bajo LC la EE disminuyó. Por otra parte, no se detectaron efectos significativos ( $P > 0,05$ ) de la historia previa de manejo (historia de pastura: 1,40 y 2,55 mm e historia agrícola 1,52 y 2,87 mm, en 2002 y 2007, respectivamente).

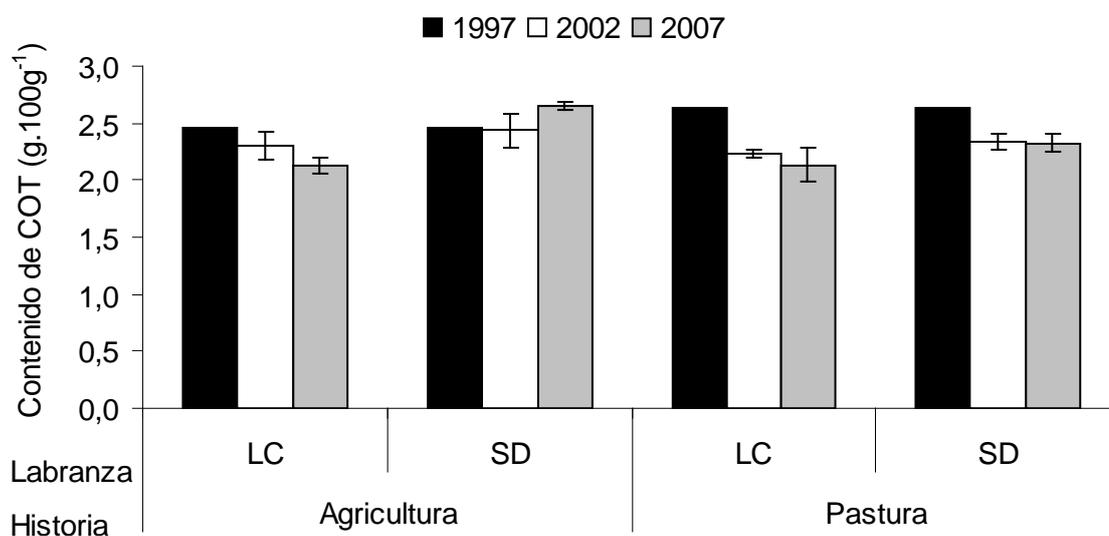
Si bien las parcelas bajo SD presentaron menores tasas de caída de EE en comparación con LC luego de 10 años de implementada, este tiempo no ha resultado suficiente para recomponer los valores iniciales de estos suelos (Figura 22), y principalmente en el caso de historia agrícola, el sistema conservacionista no presentó una marcada recuperación de la estabilidad respecto a la LC, resultado que coincide con lo informado por Domínguez *et al.* (2008).

### 3.4.3 Carbono orgánico

En la Figura 28 se presenta la evolución del contenido de COT de 0-20 cm de profundidad. Al inicio del ensayo el contenido de C en las parcelas provenientes de pastura fue  $2,64 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ , y en aquellas con 12 años de agricultura previos,  $2,47 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ .

Cuando se analizó estadísticamente la evolución de COT a través de los años, se encontraron diferencias significativas debidas a la historia previa de manejo ( $P < 0,05$ ), con mayores contenidos en historia agrícola ( $2,48 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ) respecto a historia de pastura ( $2,11 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ). Luego de 10 años de agricultura se registraron mayores caídas en las parcelas provenientes de pastura respecto a los valores de 1997 (15,5% y 3,2% para historia de pastura y agrícola, respectivamente). Estos resultados podrían deberse a la reducción de los aportes de C al pasar de una pastura a un periodo agrícola, aún con un manejo que reduciría sus pérdidas, como es el caso del sistema de SD (Studdert; Echeverría, 2002; Eiza *et al.*, 2006). Al comenzar un ciclo agrícola se reemplaza a las pasturas de crecimiento continuo y con elevada producción de biomasa aérea y radical por cultivos de cosecha de crecimiento estacional y con sistemas radicales menos densos (Haynes *et al.*, 1991). A pesar de no haberse realizado el fraccionamiento al comienzo del ensayo, se puede conjeturar que luego de varios años de pastura el COP represente una elevada proporción del C del suelo (Cambardella; Elliot, 1992). Por lo tanto, podría considerarse que la mayor tasa de reducción de COT en las situaciones con historia de pastura, habría sido originada por la caída de la fracción particulada, ya que al poseer mayor labilidad, responde con mayor rapidez a la alteración provocada por el laboreo del suelo (Janzen *et al.*, 1998)

Por otra parte, no se detectaron diferencias en el contenido de COT entre sistemas de labranza ni entre años ( $P > 0,05$ ), lo cuál estaría asociado a la condición del suelo al inicio del ensayo, ya que si se comparan los valores de 1997 ( $2,56 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ ) con los obtenidos en la condición sin disturbar ( $2,86 \text{ g} \cdot 100 \text{ g}^{-1}$ , Figura 23), podría considerarse que el suelo del ensayo presentaba un bajo nivel de alteración en su comienzo. En este sentido, Fabrizzi *et al.* (2003) obtuvieron incrementos de COP y COA en los primeros 15 cm de profundidad luego de 8 años de SD en un suelo degradado, pero no en un suelo no degradado. Estos autores concluyeron que el efecto de los sistemas de labranza depende de las características del suelo y del estado de su calidad al inicio de su aplicación.



**Figura 28-** Contenido de COT en el estrato de 0-20 cm al inicio del ensayo (1997), luego de 5 años (2002) y a los 10 años (2007) de iniciado para los tratamientos bajo labranza convencional (LC) y siembra directa (SD) con historia agrícola o de pastura. Las barras indican el error estándar de la media.

Como se mencionó anteriormente, no se detectaron diferencias entre sistemas de labranza, sin embargo, se observaron contenidos ligeramente superiores de COT bajo SD (2,38 y 2,49 g.100g<sup>-1</sup> para el año 2002 y 2007, respectivamente) en comparación con LC (2,27 y 2,13 g.100g<sup>-1</sup> para 2002 y 2007, respectivamente), tanto en 2002 como en 2007, lo que estaría asociado a una mayor mineralización provocada por el laboreo (Balesdent *et al.*, 2000). Estos resultados coinciden con lo obtenido por Micucci y Taboada (2006), quienes informaron que periodos prolongados bajo LC disminuyeron el contenido de C, y con García Préchac *et al.* (2004) quienes hallaron que en un Argiudol típico luego de 7 años bajo LC, tanto en agricultura continua como en rotación con pastura, se redujo el contenido de COT.

De acuerdo con los resultados obtenidos en los últimos 5 años, posiblemente se está alcanzando un nuevo equilibrio como fue citado por Hermle (2008) quien observó una reducción en la concentración de C en los primeros 7 años de agricultura luego de una pastura, alcanzando un nuevo equilibrio a los 12 años.

#### 4- CONCLUSIONES

Como fuera mencionado por otros autores, el CDMP (Aparicio; Costa, 2007; Ferreras *et al.*, 2007) y el COP (Janzen *et al.*, 1998; Fabrizzi *et al.*, 2003) fueron las variables que presentaron mayor sensibilidad para reflejar diferencias entre agricultura continua y la condición sin disturbar. Sin embargo, la mayoría de los indicadores evaluados en 2007 sólo permitieron detectar indicios de los efectos esperados de los tratamientos aplicados. La implementación de SD no implicó mejoras significativas respecto a LC, tal como se pudo observar al comparar el ensayo con la condición sin disturbar, así como también, con la situación al inicio del mismo (1997). Por otra parte, si bien se ha citado que la SD mejora las propiedades edáficas superficiales más notoriamente en suelos con mayor historia agrícola respecto a aquéllos no degradados (Fabrizzi *et al.*, 2005), en este estudio, luego de 10 años de agricultura continua, los sistemas de labranza empleados no provocaron un efecto diferencial según la historia previa de manejo. Por lo tanto, se reunieron evidencias suficientes para rechazar la primera y la segunda hipótesis planteadas ya que las propiedades físicas y bioquímicas analizadas no mostraron ser significativamente mejores bajo SD ni diferentes entre historias previas de manejo.

Por otra parte, se esperaba que la ausencia de remoción y el pasaje de maquinarias originaran mayor compactación en suelos bajo SD (Álvarez *et al.*, 2006), lo que podría haber afectado negativamente el desarrollo de las raíces de maíz (Díaz Zorita, 2000). En este trabajo fue mostrado que bajo SD hubo valores más elevados de RMP y, aunque no significativamente, mayor DAP en superficie, respecto a LC. No obstante, estas alteraciones en las propiedades superficiales del suelo no afectaron el comportamiento del cultivo, cuyo rendimiento fue más afectado por las deficiencias hídricas que por las variables edáficas y la disponibilidad de N. En este sentido, Calviño *et al.*, (2003) informaron para suelos someros que el 91% de la variación en el rendimiento de maíz fue explicada por la disponibilidad de agua durante un período centrado en floración. A pesar de no haber sido significativas, hubo diferencias de rendimiento entre sistemas de labranza pero que no se relacionaron con las propiedades edáficas evaluadas. Por lo tanto, no se reunieron evidencias suficientes para rechazar la tercera hipótesis planteada.

Independientemente del sistema de labranza, diez años de agricultura continua han originado compactación del suelo, principalmente en subsuperficie, y pérdida de EE. No obstante, las tendencias observadas de mejora o mantenimiento en las

propiedades edáficas superficiales bajo SD en comparación con LC a través de los años, señalan la necesidad de continuar con las evaluaciones en este ensayo de larga duración con el objetivo de conocer cómo seguirán evolucionando las variables analizadas.

## 5- BIBLIOGRAFÍA

- ABU-HAMDEH, N.H. 2003. Compaction and subsoiling effects on corn growth and soil bulk density. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67(4): 1213-1219.
- ÁLVAREZ, C.R.; TABOADA, M.A.; GUTIERREZ BOEM, F.H.; FERNANDEZ, P.L., PRYSTUPA, P. 2006. Distintos manejos del suelo en la pampa ondulada: I. Efecto sobre las propiedades edáficas. *Actas 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, septiembre de 2006. En CD*
- ÁLVAREZ, C.R.; TABOADA, M.A.; GUTIERREZ BOEM, F.H.; BONO, A.; FERNANDEZ, P.L.; PRYSTUPA, P. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the rolling pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73(4): 1242-1250.
- ÁLVAREZ, M.F.; OSTERRIETH, M.L.; LABORDE, V.B.; MONTTI, L.F. 2008. Estabilidad, morfología y rugosidad de agregados de Argiudoles típicos sometidos a distintos usos: su rol como indicadores de calidad física en suelos de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ci. Suelo* 26(2): 115-129.
- ÁLVAREZ, R.; STEINBACH, H.S. 2006. Valor agronómico de la materia orgánica. En: Álvarez, R. (ed.) *MO valor agronómico y dinámica en suelos pampeanos*. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. pp. 13-30.
- ÁLVAREZ, R.; STEINBACH, H.S. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Till. Res.* 104 (1): 1-15.
- ÁLVAREZ, R.; RUSSO, M.E.; PRYSTUPA, P.; SCHEINER, J.D.; BLOTTA, L. 1998. Soil carbon pools under conventional and no-tillage systems in Argentine Rolling Pampa. *Agron. J.* 90(2):138-143.
- ÁLVARO-FUENTES, J.; LÓPEZ, M.V.; CANTERO-MARTINEZ, C.; ARRÚE, J.L. 2008. Tillage effects on soil organic carbon fractions in mediterranean dryland agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 72(2): 541-547.
- AMATO, M.; RITCHIE, J.T. 2002. Spatial distribution of roots and water uptake of maize (*Zea mays* L.) as affected by soil structure. *Crop Sci.* 42(3):773-780.
- ANDRADE, F.H.; FERREIRO, M. 1996. Reproductive growth of maize, sunflower and soybean at different source levels during grain filling. *Field Crops Res.* 48 (2):155-165
- ANDRADE, F.; GARDIOL, J. 1995. Sequía y producción de los cultivos de maíz, girasol y soja. *Boletín Técnico N° 132. EEA Balcarce, INTA* 23 p.
- ANDRIULO, A.; CORDONE, G. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la dinámica de la materia orgánica de los suelos de la región pampeana húmeda. En: Panigatti, J.; Buschiazzi, D.; Gil, R. (eds.). *Siembra directa*, 333 pp.
- ANKENY, M.D. 1992. Methods and theory for unconfined infiltration measurements. In: Topp, G.; Reynolds, W., Green, R. eds. *Advances in measurement in soil physical properties: bringing theory into practice*. SSSA. Special Publication N° 30. pp. 123–141.
- APARICIO, V.; COSTA, J.L. 2007. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the argentinean pampas. *Soil Till. Res.* 96(1-2):155-165.

- APARICIO, V.; COSTA, J.L.; ECHEVERRÍA, H.; CAVIGLIA, O. 2002. Evaluación de propiedades edáficas y crecimiento de maíz bajo diferentes sistemas de labranza en cuatro sitios del sudeste bonaerense. *RIA* 31(3):55-71.
- ARSHAD, M.A.; FRANZLUEBBERS, A.J.; AZOOZ, R.H. 2004. Surface-soil structural properties under grass and cereal production on a Mollic Cyroboralf in Canadá. *Soil Till. Res.* 77 (1): 15-23.
- ARSHAD, M.A.; MARTIN S. 2002. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. *Agri., Ecosyst. Environ.* 88(2):153-160.
- AZOOZ, R.H.; ARSHAD, M.A. 1996. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. *Can. J. Soil Sci.* 76(2):143-152.
- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BLABANE, M. 2000. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. *Soil Till Res.* 53(3-4):215-230.
- BARBIERI, P.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS, H.R.; ANDRADE, F.H. 2008. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. *Agron. J.* 100 (4): 1094-1100.
- BARRIOS, M.B.; BUJÁN, A.; BOZZO, A.A.; DEBELIS, S.P.; DE GRAZIA, J.; LOPEZ, S.; RODRÍGUEZ, H.A.; ANDRADA, H.I.; FERNÁNDEZ, F. 2008. Variables físicas bajo diferentes sistemas de labranza. *Actas 21° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, mayo de 2008. En CD.*
- BAUDER, A.; BLACK, A.L. 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(6):1166-1170.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIECKOW, J. 2006. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-tillage. *Soil Till. Res.* 86(2):237-245.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. 1986. Bulk density. In: Klute, A. (ed.). *Methods of Soil Analysis. Part 1. 2nd ed.* Am. Soc. Agron. Madison. Wisconsin. USA. *Agron. Monog.* 9. pp 363-375.
- BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R.; OWENS, L.B.; POST, W.M.; IZAURRALDE, R.C. 2005. Strength properties and organic carbon of soils in the North Appalachian Region. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(3): 663-673.
- BLEVINS, R.L.; FRYE, W.W. 1993. Conservation tillage: an ecological approach to soil management. *Adv. Agron.* 51:33-78.
- BLEVINS, R.L.; COOK, D.; PHILLIPS, S.H.; PHILLIPS, R.E. 1971. Influence of no-tillage on soil moisture. *Agron. J.* 63(4): 593-596.
- BÖHM, W. 1979. Methods of studying root systems. In: Springer-Verlag (ed) *Ecological studies.* Berlin, Alemania. 188 p.
- BOTTA, G.F.; JORAJURIA, D.; BALBUENA, R.; ROSATTO, H. 2004. Mechanical and cropping behaviour of direct drilled soil under different traffic intensities: effect of soybean (*Glycine max L.*) yields. *Soil Till. Res.* 78(1):53-78.
- BOTTA, G.F.; RIVERO, D.; TOURN, M.; BELLORA MELCON, F.; POZZOLO, O.; NARDON, G.; BALBUENA, R.; TOLON BECERRA, A.; ROSATTO, H.; STADLER, S. 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil Till. Res.* 101(1):44-51.

- BOTTA, G.F.; TOLON BECERRA, A.; BELLORA TOURN, F. 2009. Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil Till. Res.* 103(2):381–386.
- BRADFORD, J.L. 1986. Penetrability. In Klute, A. (ed.) *Methods of soil analysis. Part 1.* 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp. 463–478.
- BREMNER, J.M. 1996. Nitrogen – Total. In: Sparks, D.L. (ed). *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods.* SSSA-ASA, Madison, Wisconsin, USA. pp.1085-1123.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma* 124(1-2): 3-22.
- BUSCHIAZZO, D.E.; PANIGATTI, J.L.; UNGER, P.W. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 49(1-2):105-116.
- BULLOCK, D.G. 1992. Crop rotation. *Critical reviews in plant sciences* 11(4):309-326.
- CABRIA, F.; CALANDRONI, M.; MONTERUBBIANESI, G. 2002. Tamaño y estabilidad de agregados y su relación con la conductividad hidráulica saturada en suelos bajo labranza convencional y praderas. *Ci. Suelo* 20(2):69-79.
- CALVIÑO, P.A., ANDRADE, F.H.; SADRAS, V.O. 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, and Crop Management. *Agron. J.* 95 (1):275–281
- CAMBARDELLA, C.A.; ELLIOTT, E.T. 1992. Particulate soil organic matter. Changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 56 (3): 777-783.
- CAMPBELL, C.A. 1978. Soil organic carbon, nitrogen and fertility. In: Schnitzer, M.; Khan, S.U. (ed.). *Soil organic matter. Developments in Soil Science* 8. Elsevier Scientific, Amsterdam, Netherlands. pp. 173-271.
- CÁRCOVA, J.; BORRÁS, L.; OTEGUI, M.E. 2003. Ciclo ontogénico, dinámica del desarrollo y generación del rendimiento de la calidad en maíz. En: Satorre, E.M.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G. A.; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. (eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo.* Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. pp:135-163.
- CARRASCO, N.; COSTA, J.L.; ZAMORA, M.S. 2008. Calidad física del suelo en el área sur de la cuenca del arroyo Claromecó. *Actas 21° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis, mayo de 2008.* En CD.
- CARTER, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agron.J.* 94 (1):38-47.
- CASTRO FILHO, C.; LURENCO, A.; GUIMARAEZ, M de F.; FONSECA, I.C.B. 2002. Aggregate stability under different soil Management Systems in a red latosol in the estate of Paraná, Brazil. *Soil Till. Res.* 65(1):45-51.
- CHAGAS, C.I.; MARELLI, H.J.; SANTANATOGLIA, O.J. 1994. Propiedades físicas y contenido hídrico de un Argiudol típico bajo tres sistemas de labranza. *Ci. Suelo.* 12(1):11-16.
- CHAGAS, C.I.; SANTANATOGLIA, O.J.; CASTIGLIOLI, M.G. 1995. Tillage and cropping effects on selected properties of an Argiudol in Argentina. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 26(5-6): 643-655.

- CHAN, K.Y.; HEENAN, D.P.; OATES, A. 2002. Soil carbon fractions and relationship to soil quality under different tillage and stubble management. *Soil Till. Res.* 63(3-4): 133-139.
- CHANEY, K.; HODGSON, D.; BRAIM, M. 1985. The effects of direct drilling, shallow cultivation and ploughing on some soil properties in a long-term experiment on spring barley. *J. Agric. Sci. Camb.* 104(1):125-133.
- CIRILO, A.G.; ANDRADE; F.H. 1996. Sowing date and kernel weight in maize. *Crop Sci.* 36 (2):325-331
- COLOMBANI, E.N.; COSTA, J.L.; STUDDERT, G.A.; SUERO, E. 2002. Evaluación de propiedades físicas de suelos del Sudeste Bonaerense bajo distintos manejos. *Actas 18° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* Puerto Madryn, Chubut, abril de 2002. En CD.
- COOPER P.J.M.; GREGORY P.J.; TULLY D.; HARRIS H.C. 1987. Improving water-use efficiency in the rainfed farming systems of west Asia and north Africa. *Expl. Agric.* 23(2):113-158.
- DAO, T.H. 1993. Tillage and winter wheat residue management effects on water infiltration and storage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57(6):1586-1595.
- DARAGHMEH, O.A.; JENSEN, J.R.; PETERSEN, C.T. 2009. Soil structure stability under conventional and reduced tillage in a sandy loam. *Geoderma* 150(1-2):64-71.
- DARDANELLI, J.L.; COLLINO, D.; OTEGUI, M.E.; SADRAS, V.O. 2003. Bases funcionales para el manejo del agua en los sistemas de producción de los cultivos de grano. En: Satorre, E.M.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G. A...; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. (eds.) *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo.* Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. pp:375-440.
- DARDANELLI, J.L.; GIL, R. 1997. Eficiencia del uso del agua en el sistema de producción. En: *Seminario de siembra directa.* INTA. Buenos Aires, octubre 1997. pp. 43-46.
- DE LEENHER, L.; DE BOODT M. 1958. Determination of aggregate stability by change in mean weight diameter. *Proc. Int. Symp. On Soil Structure.* Medelingen. Van de Landbouwhoghe School. Ghent, Bélgica. pp 290-300.
- DENEF, K.; SIX, J.; MERCKX, R.; PAUSTIAN, K. 2004. Carbon sequestration in microaggregates of no-tillage soils with different clay mineralogy. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68(6):1935-1944.
- DE ORELLANA, J.A.; PILLATTI. M.A. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ci. Suelo* 12(2):75-80.
- DEXTER, A.R. 2004. Soil physical quality. Part. I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120(3-4):201-214.
- DEXTER, A.R.; KROESBERGEN, B.; KUIPERS, H. 1984. Some mechanical-properties of aggregates of top soils from the IJsselmeer Polders. 1. Undisturbed soil aggregates. *Neth. J. Agric. Sci.* 32(1):205-214.
- DÍAZ-ZORITA, M. 2000. Effect of deep-tillage and nitrogen fertilization interactions on dryland corn (*Zea mays* L.) productivity. *Soil Till. Res.* 54(1):11-19.

- DÍAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G.A. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. *Soil Till. Res.* 54(1):121-126.
- DÍAZ-ZORITA, M.; DUARTE, G.A.; GROVE, J.H. 2002. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 65(1):1-18.
- DÍAZ-ZORITA, M.; BARRACO, M.; ALVARÉZ, C. 2004. Efectos de doce años de labranzas en un Haplustol del noroeste de Buenos Aires, Argentina. *Ci. Suelo* 22(1):11-18.
- DIOVISALVI, N.V.; STUDDERT, G.A.; DOMÍNGUEZ, G.F.; EIZA, M. J. 2008. Fracciones de carbono y nitrógeno orgánicos y nitrógeno anaeróbico bajo agricultura continua con dos sistemas de labranza. *Ci. Suelo.* 26(1):1-11.
- DOMÍNGUEZ, G.F.; STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; ANDRADE, F.H. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada de maíz. *Ci. Suelo* 19(1): 47-56.
- DOMÍNGUEZ, G.F.; STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E. 2005. Propiedades del suelo: efectos de las prácticas de manejo. En: Echeverría, H.E.; García F.O. (eds.). *Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. pp 207-229.
- DOMÍNGUEZ, G.F.; ANDERSEN, A.; STUDDERT, G.A. 2008. Cambios en la estabilidad de agregados en distintos sistemas de cultivo bajo siembra directa y labranza convencional. *Actas 21º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Potrero de los Funes, San Luís, mayo de 2008. En CD.
- DOMÍNGUEZ, G.F.; DIOVISALVI, N.V.; STUDDERT, G.A.; MONTERUBBIANESI, M. G. 2009. Soil organic C and N fractions under continuous cropping with contrasting tillage systems on Mollisols of the southeastern Pampas. *Soil Till. Res.* 102(1):93-100.
- DORAN, J.W. 1980. Soil microbial and biochemical changes associated with reduced tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44(4):765-771.
- DORAN, J.W.; JONES, A. 1996. *Methods for assessing soil quality*. Soil Science Society of America Inc. Madison, Wisconsin, USA. SSSA Special Publ. 49. 410 p.
- DORAN J.W.; PARKIN T.B. 1994. Defining and assessing soil quality. In: J.W. Doran; Coleman D.C.; Bezdicek D.F.; Stewart B.A. (eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Science Society of America Inc., Madison, Wisconsin, USA. SSSA Special Publication N° 35. pp. 3-21.
- DORAN, J.W.; SMITH, M.S. 1987. Organic matter Management and utilization on soil and fertilizer nutrients. In: Follet, R.F. (ed) *Soil fertility and organic matter as critical components of production systems*. Soil Science Society of America Inc., Madison, WI, USA. SSSA Spec. Pub. N° 19. pp. 53-72.
- DORAN, J.W.; SARRANTONIO, M.; LIEBIG, M.A. 1996. Soil health and sustainability. *Adv. Agron.* 56:1-54.
- ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS, H. 2001. Eficiencia de recuperación del nitrógeno aplicado al estadio de seis hojas del maíz bajo riego en siembra directa y labranza convencional. *Ci. Suelo* 19(1): 57-66.
- ECHEVERRÍA, H.E.; SAINZ ROZAS, H. 2005. Maíz. En: Echeverría, H.E.; García, F.O. (eds.). *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*. Ediciones INTA. Buenos Aires, Argentina. pp: 255-282.

- ECHEVERRÍA, H.E.; BERGONZI, R.; FERRARI, J. 1994. Un modelo para estimar la mineralización de nitrógeno en suelos del sudeste bonaerense. *Ci. Suelo* 12(2):56-62.
- EHLERS, W.; KOPKE, W.; HESSE, F.; BOLUNT, W. 1983. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled losses soil. *Soil Till. Res.* 3 (3):261-275.
- EIZA, M.J.; FIORITI, N.; STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E. 2005. Fracciones de carbono orgánico en la capa arable: efecto de los sistemas de cultivo y de la fertilización nitrogenada. *Ci. Suelo* 23(1):59-68.
- EIZA, M.J.; STUDDERT, G.A.; FIORITTI, N.; DOMÍNGUEZ, G.F. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en Molisoles de Balcarce. *Actas 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Salta-Jujuy, septiembre de 2006. En CD.*
- ELISSONDO, E.; COSTA, J.L.; SUERO, E.; FABRIZZI, K.P.; GARCÍA, F. 2001. Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos luego de la introducción de labranzas verticales en un suelo bajo siembra directa. *Ci. Suelo* 19(1):11-19.
- ELLIOTT, E.T. 1986. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50(3):627-633.
- FABRIZZI, K.P.; MORÓN, A.; GARCÍA, F.O. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fraction in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67(6):1831-1841.
- FABRIZZI, K.P.; GARCÍA, F.O.; COSTA, J.L.; PICONE, L.I. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 81(1): 57-69.
- FERRERAS, L.; COSTA, J.L.; GARCÍA, F.O.; PECORARI, C. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil Till. Res.* 54(1-2):31-39.
- FERRERAS, L.; DE BATTISTA, J.J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesqui. Agropecu. Bras.*, 36:161-170.
- FERRERAS, L.; MAGRA, G.; BESSON, P.; KOVALEVKI, E.; GARCIA, F. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ci. Suelo* 25 (2):159-172.
- FORJÁN, H.J. 2000. Rotaciones en sistemas mixtos: la pastura perenne base de la agricultura sustentable en la región. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación; INTA Centro Regional Buenos Aires Sur. Material didáctico N° 1. 11 p.
- FORJÁN, H.J. 2005. Expansión agrícola en la región: una señal de alerta..INTA Publicaciones Regionales. *Agrobarrow* 32:12-13.
- FOX, R.H.; BANDEL. V.A. 1986. Nitrogen utilization with no-tillage. In: Sprague, M.A.; Triplett, G.B. (eds.). *No-tillage and surface-tillage agriculture. The tillage revolution.* John Wiley and Sons, New York, U.S.A. pp:117-148.
- FRANCIS, G.S.; KNIGHT, T.L. 1993. Long-term effects of conventional and no-tillage on selected soil properties and crop yields in Canterbury, New Zealand. *Soil Till. Res.* 26(1):193-210

- FRANZLUEBBERS, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66(2):95-106.
- FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.; ZUBERER C. 1995. Tillage and crop effects on seasonal soil carbon and nitrogen dynamics. *Soil Sci. Soc. Am J* 59(6):1618-1624.
- FRANZLUEBBERS, A.J.; LANGDALE, G.W.; SCHOMBERG, H.H. 1999. Soil carbon, nitrogen and aggregation in response to type and frequency of tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(2): 349-355.
- GALANTINI, J.A., LANDRISCINI, M.R., HEVIA, C. 2006 Contenido y calidad de la materia orgánica particulada del suelo en siembra directa. *Actas 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy, septiembre de 2006. En CD.*
- GARCÍA, J.R; BLECKWEDEL, C.; GIMÉNEZ, D.; CÁCERES, M.R.; PIETROBONI, A.M. 1993. La degradación de los suelos agrícolas del este Tucumano. *Actas 12° Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Salamanca-España, septiembre de 1993. pp:1280-1285.*
- GARCÍA-PRECHAC, F.; ERNST, O.; SIRI-PRIETO, G.; TERRA, J.A. 2004. Integrating no-till in to crop–pasture rotations in Uruguay. *Soil Till. Res.* 77(1):1–13.
- GIL, R.; GARAY, A. 2001. La SD y el funcionamiento sustentable del suelo. En: Panigatti, J.; Buschiazzo, D.; Marelli, H. (eds.). *Siembra Directa II. Ediciones INTA, Buenos Aires, Argentina. pp:5-15.*
- GRANDY, A.S.; ROBERTSON, G.P. 2006. Aggregation and organic matter protection following tillage of a previously uncultivated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(4):1398–1406.
- GRANDY, A.S.; ROBERTSON, G.P.; THELEN, K.D. 2006. Do productivity and environmental trade-off justify periodically cultivating no-till cropping systems? *Agron. J.* 98(6): 1377-1383.
- GRANT, C.A.; LAFOND, G.P. 1993. The effects of tillage systems and crop sequences on soil bulk density and penetration resistance on clay soil in southern Saskatchewan. *Can. J. Soil Sci.* 73(2):223-232.
- GRANT, R.; JACKSON, B.; KINIRY, J.; ARKIN, G. 1989. Water deficit timing effects on yield components in maize. *Agron. J.* 81(1):61-65.
- GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; DORAN J.W.; PANKURST C.E., DWYER, L.M. 1997. Biological attributes of soil quality. In: Gregorich, E.G.;Carter,M. R. (eds.). *Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands. pp: 81-113.*
- GRIFFITH, D.R., MANERRING, J.V.; MOLDENHAUER, W.C. 1977. Conservation tillage in the Eastern Corn Belt. *J. Soil Water Cons.* 32(1):20-28.
- GUDELJ, O.; MASIERO, B. 2000. Efecto del manejo del suelo sobre su estabilidad estructural. *Actas 17° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires, abril de 2000. En CD.*
- GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6 :65-100.
- HAMBLIN, A.P. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95-158.

- 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(5):1515-1519.
- HAVLIN, J.L.; KISSEL, D.E; MADDUX, L.D.; WAASEN, M.M., LONG, J.H. 1990. Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54(2):448-452.
- HAYNES, R.J.; SWIFT, R.S.; STEPHEN, R.C. 1991. Influence of mixed cropping rotations (pasture-arable) on organic matter content, water stable aggregation and clod porosity in a group of soil. *Soil Till. Res.* 19(1):77-87.
- HERMAWAN, B.; CAMERON, K.C. 1993. Structural changes in a silt loam under long term conventional or minimum tillage. *Soil Till. Res.* 26(2):139-150.
- HERMLE, S.; ANKEN, T.; LEIFEDL, J.; WEISSKOPF, P. 2008. The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil Till. Res.* 98(1):84-105.
- HILL, R.L.; CRUSE, R.M. 1985. Tillage effects on bulk density and soil strength of two mollisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49(5):1270-1273.
- HUBBARD, R.K.; HARGROVE, W.L.; LOWRANCE, R.R., WILLIAMS, R.G; MULLINIX, B.G. 1994. Physical properties of a clayey coastal plain soil as affected by tillage. *J. Soil Water Cons.* 49(3):276-283.
- JANZEN, H. H. 2006. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? *Soil Biol. Biochem.* 38(3):419-424.
- JANZEN, H.H; CAMPBELL, C.A.; IZAURRALDE, R.C.; ELLERT, B.H.; JUMA, N.; MCGILL, W.B.; ZENTNER, R.P. 1998. Management effects on soil C storage on the Canadian Prairies. *Soil Till. Res.* 47(3-4):181-95.
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.; CLINE, R.; HARRIS, R.; SCHUMAN, G. 1997. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(1):4-10.
- KAY, B.D.; VANDERBYGAART, A.J. 2002. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. *Soil Till. Res.* 66(2):107-118.
- KEENEY, D.R.; NELSON, D.W. 1982. Nitrogen inorganic forms. In: Page, A.L. (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2, Chemical and Microbiological properties.* ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, EEUU. Agron. Monog 9. pp 643-698.
- KINIRY, J.R.; RITCHIE, J.T. 1985. Shade-sensitive interval of kernel number in maize. *Agron. J.* 77(5):711-715.
- KONG, A.Y.Y.; SIX, J.; BRYANT, D.C.; DENISON, F.; VAN KESSEL, C. 2005. The relationship between carbon input, aggregation, and soil organic carbon stabilization in sustainable cropping systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69(4):1078-1085
- KRÜGER, H.R. 1996. Compactación en Haplustoles del Sudoeste Bonaerense (Argentina) bajo cuatro sistemas de labranza. *Ci. Suelo* 14(2):104-106.
- KUEHL, R.O. 2001. *Diseño de Experimentos. Principios estadísticos para el diseño y análisis de investigaciones* 2ª Ed. Thomson International. México. 680 p.
- LAL, R. 1976. No-tillage effects on soil properties under different crops in western Nigeria. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 242-245.

- LAL, R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: tropics versus temperate environment. *Adv. Agron.* 42:85-197.
- LAL, R. 1994. Methods and guidelines for assessing sustainable use of soil and water resources in the tropics. USDA-The Ohio State University. SMSS Technical Monograph N° 21.78 p.
- LAL, R.; MAHBOUBI, A.A.; FAUSEY, N.R. 1994. Long-term tillage and rotations effects on properties of a Central Ohio soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 517-522.
- LAMPURLANÉS, J.; CANTERO-MARTINEZ, C. 2003. Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management systems and their relationship with barley root growth. *Agron. J.* 95(3):526-536.
- LANGMAACK, M. 1999. Earthworm communities in arable land influenced by tillage, compaction, and soil. *Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz* 8(1):11-21.
- LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: Doran, J.W. (ed.), *Defining Soil Quality for a Sustainable Environment*. Soil Science Society of America Special Publication No. 35. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, WI, pp. 37-51
- LAVELLE, P.; BIGNELL, D.; LEPAGE, M.; WALTERS, V.; ROGER, P.; INESON, P.; HEAL, O.W.; DHILLION, S. 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem a changing engineers. *Eur. J. Soil Biol.* 33(4):159-193.
- LEI, J.; WU, F.; WANG, J.; GUO, J. 2008. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield. *Nongye Gongcheng Xuebao. T. Chinese Soc. Agri. Eng.* 24(10):40-45.
- LITTELL, R.C.; MILLIKEN, G.A.; STROUP, W.W.; WOLSINGER, R.D.; SCHABENBERGER, O. 2006. SAS ® for mixed models, second edition. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA. 633 p.
- MADDONNI G.A.; URRICARIET A.S.; GHERSA, C.M.; LAVADO, R.S. 1999. Assessing soil quality in the Rolling Pampa, using soil properties and maize characteristics. *Agron. J.* 91(2):280-287.
- MADDONNI, G.A.; RUIZ, R.; VILARIÑO, P.; GARCÍA DE SALAMONE, I. 2003. Fertilización en los cultivos para grano. En: Satorre, E.M.; Benech Arnold, R.L.; Slafer, G. A...; de la Fuente, E.B.; Miralles, D.J.; Otegui, M.E.; Savin, R. (eds.). *Producción de granos. Bases funcionales para su manejo*. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. pp.:499-557.
- MANUEL-NAVARRETE, D.; GALLOPIN, G.; BLANCO, M.; DIAZ-ZORITA, M.; FERRARO, D.; HERZER, H.; LATERRA, P; MORELLO, J.; MURMIS, M.; PENGUE, W.; PIÑEIRO, M.; PODESTÁ, G.; SATORRE, E.; TORRENT, M.; TORRES, F.; VIGLIZZO, E.; CAPUTO, M. y CELIS, A. 2005. Análisis sistémico de la agriculturización en la Pampa Húmeda argentina y sus consecuencias en regiones extrapampeanas: sostenibilidad, brechas de conocimiento e integración de políticas. División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, CEPAL, Naciones Unidas. Serie Medio Ambiente y Desarrollo N° 118. 65 p.
- MARELLI, H. J. 2001. El agua y la siembra directa. *Siembra Directa en el Cono Sur*. PROCISUR. Montevideo, Uruguay. 450 p.
- MARTÍNEZ, E.; FUENTES, J.P.; SILVA, P.; VALLE, S.; ACEVEDO, E. 2008. Soil physical properties and wheat root growth as affected by no-tillage and

- conventional tillage systems in a mediterranean environment of Chile. *Soil Till. Res.* 99(2):232-244.
- MEINSINGER, J.J.; BANDEL, V.A.; STANFORD, G.; LEGG, J.O. 1985. Nitrogen utilization of corn under minimal tillage and mouldboard plow tillage: I. Four years results using labelled N fertilizer on an Atlantic Coastal Plain soil. *Agron. J.* 77:602-611.
- MICUCCI, F.G.; TABOADA, M.A. 2006. Soil physical properties and soybean (*Glycine max*, Merrill) root abundance in conventionally- and zero-tilled soils in the humid Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 86(2):152-162.
- MICHELENA, R.O.; IRURTIA, C.B.; VAVRUSKA, F.A.; MON, R.; PITTALUGA, A. 1989. Degradación de suelos del Norte de la Región Pampeana. INTA. Centros Regionales de Buenos Aires Norte, Córdoba, Entre Ríos y Santa Fé. Proyecto de Agricultura Conservacionista. Publicación Técnica 6. 120 p.
- MORELLO, J. 2005. Entrando al Chaco con y sin el consentimiento de la Naturaleza. *Vida Silvestre* 92:18-23.
- MURAGE, E.W.; VORONEY, P.R.; KAY, B.D.; DEEN, B.; BEYAERT, R.P. 2007. Dynamics and turnover of soil organic matter as affected by tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(4):1363-1370.
- NARRO FARIAS, E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Ed. Trillas. México 194 p.
- NASK, H.M.; SELES, F. 1995. Seedling emergence as influenced by aggregate size, bulk density, and penetration resistance of the seedbed. *Soil Till. Res.* 34(1): 61-76.
- NEEDELMAN, B.A.; WANDER, M.M.; BOLLERO, G.A.; BOAST, C.W.; SIMS, G.K.; BULLOCK, D.G. 1999. Interaction of tillage and soil texture: Biologically active soil organic matter in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(5):1326-1334.
- NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. 1982. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: Page, A.L. (eds.) *Methods of soil analysis. Part 2.* 2nd ed. ASA and SSSA, Madison, Wisconsin, USA. *Agron. Monogr.* 9. pp. 539-579.
- NIELSEN, D.C.; UNGER, P.; MILLER, P.R. 2005. Efficient water use in dryland cropping systems in the Great Plains. *Agron. J.* 97(2):364-372.
- NOELLEMEYER, E.; QUIROGA, A.R.; ESTELRICH, D. 2005. Soil quality in three range soil of the semiarid pampa of Argentina. *J. Arid Environ.* 65(1):142-155.
- OADES, J.M. 1984. Soil organic matter and structural stability mechanisms and implications for management. *Plant Soil* 76(1-3):319-337.
- OTEGUI, M.E. 1995. Prolifacy and grain yield components in modern argentinean maize hybrids. *Maydica* 40(1):371-376.
- OTEGUI, M.E.; ANDRADE, F.H.; SUERO, E.E. 1995. Growth, water use and kernel abortion of maize subjected to drought at silking. *Field Crop Res.* 40(2):87-94.
- PERFECT, E.; KAY, B.D.; LOON, W.K.P.; SHEARD, R. W.; POSAJOK, T. 1990. Rates of change in soil structural stability under forages compared to corn. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54 (1): 179-186.
- PIDGEON, J.D.; SOANE, B.D. 1977. Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in a long-term barley monoculture system. *J. Agric. Sci. Camb.* 88(2):431-442.

- POWER, J.F. 1994. Understanding the nutrient cycling process. *J. Soil Water Conser.* 49(2):16-23.
- PUGET, P.; LAL, R. 2005. Soil organic carbon and nitrogen in a Mollisol in central Ohio as affected by tillage and land use. *Soil Till. Res.* 80(1-2):201-213.
- QUIROGA, A.; ORMEÑO, O.; PEINEMANN, N. 1998. Efectos de la siembra directa sobre propiedades físicas de los suelos En: Panigatti, J.; Marelli, H.; Buschiazzo, D.; Gil, R. (eds.). *Siembra Directa*. INTA Hemisferio Sur. Buenos Aires, Argentina. pp. 237-243.
- QUIROGA, A.; BUSCHIAZZO, D., PEINEMANN, N. 1999. Soil compaction is related to managements practices in the semiarid Argentine pampas. *Soil Till. Res.* 52(1-2):21-28
- QUIROGA, A.; FUNARO, D.; NOELLEMEYER, E.; PEINEMANN, N. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil Till. Res.* 90(1-2):63-68.
- RABINOVICH, J.; TORRES, F. 2004. Caracterización de los Síndromes de sostenibilidad del desarrollo. El caso de la Argentina. CEPAL. Santiago de Chile. Serie seminarios y conferencias N° 38. 97 p.
- REARTE, D.H. 1996. La integración de la ganadería argentina. INTA, SAGPyA. 48 p.
- RESSIA, J.M.; MENDIVIL, G.O.; BALBUENA, R.H.; CHIDICHIMO, O. 1998. Root growth and grain yield of corn in relation to tillage systems. *Proceedings of the 3° Argentine Congress of Agricultural Engineering*. La Plata, Buenos Aires, noviembre de 1998. 1:98-104.
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY C.F.; TANA C.S.; LU X. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110(1-2): 131-146
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service, Ames, Iowa, USA. Special report 48. 24 p.
- RIZZALLI, R. H. (1998) Siembra directa y convencional de maíz ante distintas ofertas de nitrógeno. Tesis *Magister Scientiae*. Universidad Nacional de Mar del Plata. Facultad de Ciencias Agrarias, Balcarce, Argentina. 35 p.
- ROBINSON, C.A.; CRUSE, R.M.; KOHLER, K.A. 1994. Soil management. In: Hatfield, J.L.; Karlen, D.L. (eds.) *Sustainable agriculture systems*. Lewis Publ., Boca Raton, Florida, USA. pp.109-134.
- SAINZ ROZAS, H.R.; ECHEVERRÍA, H.E.; STUDDERT, G.A.; DOMINGUEZ, G.F. 2000. Evaluation of the presidedress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. *Agron. J.* 92(6):1176-1183.
- SALINAS-GARCIA, J.R.; HONS, F.M; MATOCHA, J.E. 1997. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(1):152-159.
- SÁNCHEZ, H.A.; GARCÍA, J.R. 1998. Efecto del laboreo en algunas propiedades físicas de un Haplustol típico y en el rendimiento de la soja. *Actas 16° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Carlos Paz, Córdoba, mayo de 1998. En CD.
- SÁNCHEZ, H.A.; GARCÍA, J.R.; CÁCERES, M.R.; CORBELLA, R.D. 1998a. Labranzas en la región Chacopampeana subhúmeda de Tucumán. En: Panigatti,

- J.L.; Marelli, H.; Buschiazzi, D.; Gil, R. (eds.). Siembra Directa. INTA Hemisferio Sur, Buenos Aires, Argentina. pp. 245-256.
- SÁNCHEZ, S.R., STUDDERT, G.A, ECHEVERÍA, H.E.1998b. Dinámica de la mineralización del nitrógeno de residuos de cosecha en descomposición en un Argiudol típico. *Ci. Suelo* 16(1):1-6.
- SANZANO, G.A.; CORBELLA, R.D.; GARCÍA, J.R.; FADDA, G.S. 2005. Degradación física y química de un Haplustol típico bajo distintos sistemas de manejo de suelo. *Ci. Suelo* 23(1-2):93-100.
- SAS INSTITUTE. 1999. SAS user's guide: Statistics Vers. 8. SAS Inst. Inc. Cary. NC, USA. 956 p.
- SASAL, M.C.; ANDRIULO, A.E. and TABOADA, M.A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87(1):9-18.
- SAUER, T.; HATFIELD, J.; PRUEGER, J. 1996. Corn residue age and placements effects on evaporation and soil thermal regime. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60(5):1558-1564.
- SCHLICHTING, E.; BLUME, H.P.; STAHR, K. 1995. *Bodenkundliches Praktikum*. Paul Parey. Hamburg. 209 p.
- SHAW, R.H. 1988. Climate requirement. In: Sprague, G.F.; Dudley, J.W. (eds.). *Corn and corn improvement* 3rd ed. American Society of Agronomy Inc. Publishers. Madison, Wisconsin, USA. Series Agronomy 18. pp. 609-638.
- SINCLAIR, T.R.; TANNER, C.B.; BENNETT, J.M. 1984. Water-use efficiency in crop production. *BioScience* 34(1):36-40.
- SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. 1999. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:1350-1358
- SIX, J.; ELLIOT, E.T.; PAUSTIAN, K. 2000. Soil macroaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* 32(14):2099-2103.
- SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E.A.; PAUSTIAN, K. 2002. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil* 241(2):155-176.
- SO, H.B.; GRABSKI, A.; DESBOROUGH, P. 2009. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia. *Soil Till. Res.* 104(1): 180-184.
- SOANE, B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: A review of some practical aspects. *Soil Till. Res.* 16(1-2): 179-201.
- SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil Till. Res.* 35(1-2): 5-22.
- STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. 1999. *Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulphur, micronutrients*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. USA. 427 p.
- STRUDLEY, M.W.; GREEN, T.R.; ASCOUGH, J.C. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Till. Res.* 99(1): 4-48.

- STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E. 2000. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64(4):1496-1503.
- STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E. 2002. Rotaciones mixtas, labranzas y carbono orgánico en la capa arable en el sudeste bonaerense. *Actas 18° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Puerto Madryn, Chubut, abril de 2002. En CD.
- STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E.; CASANOVAS, E.M. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61(5):1466-1472.
- TABOADA, M.A. 2008. Influencia de la textura y la estructura de los suelos sobre la fertilidad física. En: Taboada, M.A.; Álvarez, C.R (eds.). *Fertilidad física de los suelos 2º ed.* Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. pp. 9-30.
- TABOADA, M.A.; MICUCCI, F.G. 2002. *Fertilidad física de los suelos*. Ed. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. 80 p.
- TABOADA, M.A.; MICUCCI, F.G.; COSENTINO, D.J.; LAVADO, R.S. 1998. Comparison of compaction induced by conventional and zero tillage in two soils of the rolling pampa of Argentina. *Soil Till. Res.* 49(1-2):57-63.
- TABOADA, M.A.; MICUCCI, F.G.; ÁLVAREZ, C.R. 2008. Impedancias mecánicas y compactación en suelos agrícolas. En: Taboada, M.A.; Álvarez, C.R (eds.). *Fertilidad física de los suelos 2º ed.* Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina. pp. 94-153.
- TAN, Z.; LAL, R.; OWENS, L.; IZAURRALDE, R.C. 2007. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice. *Soil Till. Res.* 92(1-2):53-59. 25.
- TAYLOR, H.; RATLIFF, L. 1969. Root elongation rates of cotton and peanuts as a function of soil strength and soil water content. *Soil Sci.* 108(2): 113-119.
- THOMPSON, L.M. 1986. Climatic change, weather variability and corn production. *Agron. J.* 78:649-653.
- THREADGILL, E. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *T. ASAE.* 25(4):859-863
- TISDALL, J.M.; OADES, J. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33(2):141-161.
- UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. 1995. Nitrogen deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development dry matter partitioning and kernel set. *Crop Sci.* 35(5):1376-1383.
- UHART, S.; ECHEVERRÍA, H.E. 2002. Diagnóstico de la fertilización. En: Andrade F.H; Sadras V (Eds.). *Bases para el manejo del maíz, girasol y soja*. E.E.A. Balcarce INTA – FCA, UNMdP. Balcarce, Argentina. pp. 235-268.
- URRICARIET S.; LAVADO, R S. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ci. Suelo* 17(1):37-44.
- VÁZQUEZ M.E., BERASATEGUI, L.A.; CHAMORRO, E.R.; TAQUINI, L.A.; BARBERIS, L.A. 1990. Evolución de la estabilidad estructural y diferentes propiedades químicas según el uso de los suelos en tres áreas de la pradera pampeana. *Ci. Suelo* 8(2):203-210.

- VEIHMEYER, F.J.; HENDRICKSON, A.H. 1948. Soil density and root penetration. *Soil Sci.* 65(6):487-493.
- VEPRASKAS, M.J. 1988. Bulk density values diagnostic of restricted root growth in coarse-textured soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 52(4):1117-1121.
- VIDAL, C.; COSTA, J.L. 2000. Evaluación de algunas propiedades físicas en sistemas de labranza reducida y siembra directa. *RIA* 29(1):61-68.
- WANDER M.M.; BOLLERO; G. 1999. Soil quality assessment of tillage impacts in Illinois. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(4):961-971.
- WANDER M.M.; TRAINA, S.J.; STINNER, B.R.; PETERS, S.E. 1994. Organic and conventional management effects on biologically-active soil organic matter pools. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58(4):1130-1139.
- WANDER, M.M.; BIDART, M.G.; AREF S. 1998. Tillage impacts on depth distribution of total and particulate organic matter in three Illinois soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62(6):1704-1711.
- WILLSON, T.C.; PAUL, E.A.; HARWOOD R.R. 2001. Biologically active soil organic matter fractions in sustainable cropping systems. *Appl. Soil Ecol.* 16(1):63-76.
- WRIGHT, A.L.; HONS, F.M. 2005. Tillage impacts on soil aggregation and carbon and nitrogen sequestration under wheat cropping sequences. *Soil Till. Res.* 84(1): 67-75.
- YOO, G.; WANDER, M.M. 2006. Influence of tillage practices on soil structural controls over carbon mineralization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 70(2):651-659.
- YOO, G.; NISSEN, T.M.; WANDER, M.M. 2006. Use of physical properties to predict to effects of tillage practices on organic matter dynamics in three Illinois soils. *J. Environ. Qual.* 35(4):1576-1583.
- ZINN, Y.L.; RATTAN, L.; BIGHAM, J.M.; RESCK, D.V.S. 2007. Edaphic controls on soil organic carbon retention in the Brazilian Cerrado: soil structure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 71(4):1215-1224.