

INDICADORES DE CALIDAD FÍSICA EN SUELOS DE LA REGIÓN PAMPEANA NORTE DE ARGENTINA BAJO SIEMBRA DIRECTA

LAURA FERRERAS^{1(*)}; GUSTAVO MAGRA¹; PABLO BESSON¹;
ESTEBAN KOVALEVSKI² & FERNANDO GARCÍA³

¹Facultad de Ciencias Agrarias-UNR, Campo Experimental JF Villarino, CC 14, Zavalla (2125), Santa Fe. lferrera@unr.edu.ar

²Asesor actividad privada

³Instituto Internacional de Nutrición de Plantas-IPNI Cono Sur, Av. Santa Fe 910, Acassuso, Buenos Aires

Recibido: 29/06/07

Aceptado: 25/09/07

RESUMEN

El uso sustentable de las tierras requiere conservar propiedades edáficas que son importantes desde el punto de vista de la fertilidad y el laboreo del suelo. La alteración de las condiciones del suelo por el manejo puede afectar la producción de los cultivos debido a que influye en la distribución de la materia orgánica y dinámica de nutrientes; como así también sobre la agregación y porosidad del suelo. Una de las regiones del mundo donde los suelos han sido sujetos a un intenso uso agrícola durante las últimas décadas es la Región Pampeana Norte. En los últimos años los productores han adoptado la siembra directa en forma creciente. El objetivo de este trabajo fue evaluar, en suelos representativos de esta región, parámetros de calidad física del suelo en sistemas agrícolas bajo siembra directa en comparación con el mismo tipo de suelo en su condición quasi-prístina. Se realizó la caracterización física de suelos cultivados de once establecimientos correspondientes a ensayos de la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe ubicados en las provincias de Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires. Se realizó además un muestreo en un sector adyacente sobre el mismo tipo de suelo en su condición quasi-prístina. Se extrajeron muestras compuestas de suelo a dos profundidades: 0-0,08 m y 0,08 m al límite inferior del horizonte Ap y se evaluó el porcentaje de agregados estables al agua (Ea) y al etanol (Ee), el carbono orgánico total (COT), la densidad aparente (DA) y la densidad del suelo máxima (DMAX). La resistencia mecánica (RM) se midió a intervalos de 0,05 m desde superficie hasta 0,35 m de profundidad. Se constituyeron dos grupos de suelos en función de la textura: el Grupo I (con un contenido de arcilla en superficie que oscila entre 215 y 265 g kg⁻¹) y el Grupo II (suelos que poseen entre 98 y 170 g kg⁻¹ de arcilla en superficie). Los valores de Ea, Ee y COT fueron mayores ($p \leq 0,05$) en los suelos no perturbados o quasi-prístinos en comparación con los suelos adyacentes cultivados, tanto en superficie como en profundidad. Los suelos del Grupo I presentaron mayor Ea, Ee y COT con respecto a los del Grupo II. La reducción de COT que se produjo por el manejo fluctuó entre 10 y 44%. Se hallaron relaciones directas entre COT y Ea y Ee, respectivamente. A similar concentración de COT, se hallaron mayores valores de Ee en los suelos del Grupo I. La DA y DMAX fueron mayores en el suelo cultivado con respecto a la situación quasi-prístina. Los suelos del Grupo I, en general, presentaron valores más bajos de DA y DMAX en ambas profundidades de muestreo, con respecto al Grupo II. Se halló una relación inversa entre DMAX y COT. Las pérdidas de COT y la inestabilidad estructural resultante aumentaron la susceptibilidad de los suelos a la compactación. La RM fue superior en los suelos cultivados que en los quasi-prístinos, alcanzando valores que superaron el límite crítico de 2,0 MPa, donde se ve afectado el crecimiento de las raíces y el abastecimiento de fluidos. De la información obtenida se desprende que los indicadores de fertilidad física más sensibles o los que aportaron más información en este relevamiento, fueron Ea y Ee. El estudio de la estructura contribuyó a comprender el efecto de los factores externos sobre el suelo, en particular los antrópicos.

Palabras clave. Propiedades físicas del suelo, estabilidad estructural, compactación, resistencia mecánica, carbono orgánico, siembra directa.

PHYSICAL QUALITY INDICATORS IN SOILS FROM THE NORTHERN PAMPA REGION OF ARGENTINA UNDER NO TILL MANAGEMENT

SUMMARY

Sustainable land use implies the conservation of soil properties associated both to fertility and tillage. Soil alterations induced by management may affect crop production since management practices influence organic matter distribution and nutrient dynamics, and also soil aggregation and porosity. The Argentinean Northern Pampa is one of the region of the world where soils have been subjected to an intensive agricultural use during the last decades, and where direct drilling has been increasingly adopted. The aim of the present work was to evaluate soil physical quality parameters from agricultural systems under no tillage, in soils representative of the Northern Pampa Region, and to compare them with the same soil type but under pristine condition. A soil physical characterization of plots under cropping was carried out on eleven fields included in the Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe, with trials located in Santa Fe, Córdoba and Buenos Aires Provinces. Also, a sampling in an adjacent undisturbed sector with the same soil type was carried out. Soil composite samples were collected at two depths (0-0.08 m and 0.08 m to the lower limit of the Ap horizon). Water and ethanol stable aggregate percentage (Ea and Ee, respectively), total organic carbon (COT), bulk density (DA) and maximum soil density were determined (DMAX). Mechanical resistance (RM) was measured at 0.05 m increments

from the soil surface to 0.35 m depth. Soils were clustered in two groups according to their texture: Group I (surface clay content between 215 and 265 g kg⁻¹) and Group II (surface clay content between 98 and 170 g kg⁻¹). Higher values of Ea, Ee and COT were found in both surface and deep layers in the undisturbed soil with respect to cropped soil ($p \leq 0.05$). Soils from Group I showed higher Ea, Ee and COT with respect to those from the Group II. Total organic carbon decrease because of management was between 10 and 44%. Direct relationships were found between Ea and COT, and Ee-COT, respectively. Soils from the Group I showed higher levels of Ea than soils from Group II at similar COT contents. Bulk density and DMAX were higher in soils from cropped plots than in the reference undisturbed soils. Soils from the Group I showed, in general, lower DA and DMAX values, at both sampling depths, than those from the Group II. An inverse relationship was found between DMAX and COT. The loss of COT and the structural instability increase soil susceptibility to compaction. The RM from the cropped plots was higher to that from the undisturbed soils, and reached values greater than the limit of 2.0 MPa, at which root growth and fluids supply are affected. Soil indicators of physical fertility that were more sensitive or more informative in this study were Ea and Ee. The analysis of soil structure contributes to understand the effect of external factors on the soil, particularly the anthropogenic ones.

Key words. Soil physical properties, structural stability, soil compaction, mechanical resistance, organic carbon, no-tillage.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha incrementado el interés en evaluar la calidad y la salud del recurso suelo debido a que es un componente fundamental de la biosfera, cumpliendo funciones en la producción de alimentos, fibras y energía, como así también en el mantenimiento de la calidad ambiental (Doran & Zeiss, 2000; Gil-Sotres *et al.*, 2005). La calidad de muchos suelos de diversas áreas de nuestro planeta ha declinado significativamente desde que sistemas pastoriles o forestales fueron paulatinamente reemplazados por la actividad agrícola. Este proceso de agriculturización creciente, en muchas situaciones desmedido, sumado al manejo inadecuado de las tierras ha conducido al deterioro de la estructura del suelo y a la consecuente reducción en el nivel de materia orgánica, con una marcada disminución de la fertilidad química y física del suelo (Salinas-García *et al.*, 1997).

En nuestro país, a partir de la década del '80, también se ha manifestado el proceso de degradación de los suelos como consecuencia de la intensificación de las actividades agrícolas (Urricariet & Lavado, 1999; Micucci & Taboada, 2006). La agricultura continua, el uso de sistemas de labranza agresivos y, sumado a esto, el monocultivo de soja o la secuencia trigo/soja en vastas zonas de la Región Pampeana, provocaron el deterioro de las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos y el incremento de la superficie afectada por procesos erosivos y de degradación (Buschiazzo *et al.*, 1998; Micucci & Taboada, 2006). Este uso del suelo ha sido particularmente intenso en el sector norte de la Región Pampeana, generando preocupación respecto al estado de conservación del recurso.

En este contexto surge la necesidad de implementar sistemas de manejo sustentables, los cuales deben satisfacer los requerimientos de la población humana, a su vez hacer un uso eficiente de los recursos y, por último,

mantener un equilibrio con el medio que sea favorable tanto para los seres humanos como para la mayoría de las otras especies (Doran & Zeiss, 2000).

Desde un enfoque agronómico, el uso sustentable de las tierras destinadas a actividades agropecuarias requiere conservar propiedades edáficas que son importantes desde el punto de vista de la fertilidad y el laboreo del suelo (Bezdicsek *et al.*, 1996). Los sistemas de manejo sustentables para las tierras agrícolas, generalmente se basan en prácticas de manejo conservacionistas tales como la labranza reducida, la incorporación de materia orgánica y la rotación de cultivos (Pankhurst *et al.*, 1996). La implementación de la siembra directa, es decir la no labranza del suelo, puede mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos puesto que contribuyen, en general, a mantener o incrementar el nivel de carbono orgánico del suelo (Franzluebbers *et al.*, 1999; Dexter, 2004). Si bien, estas labranzas conservacionistas son importantes para reducir la degradación del suelo, en algunas situaciones pueden también conducir a un exceso de compactación (Schjønning & Rasmussen, 2000; Ferreras *et al.*, 2000; Fabrizzi *et al.*, 2005). El resultado final de implementar estos sistemas de labranza depende de diversos factores tales como tipo de suelo, condiciones climáticas y sistemas de manejos previos (Ferreras *et al.*, 2000).

La alteración de las condiciones del suelo por las prácticas de manejo puede afectar la producción de los cultivos, por un lado, a través de su influencia en la distribución de la materia orgánica, actividad microbiana y dinámica de nutrientes; y, por otro lado, modificando propiedades físicas del suelo como agregación y porosidad (Martens & Frankenberger, 1992; Salinas-García *et al.*, 1997; Díaz Zorita *et al.*, 2002).

La calidad física de los suelos se refiere fundamentalmente a parámetros como la resistencia mecánica, la

transmisión y el almacenaje de fluidos en la zona de exploración de las raíces. Los suelos con buena calidad física deben tener características de almacenaje y transmisión de fluidos que permitan proporciones adecuadas de agua, nutrientes disueltos y aire como para promover el máximo desarrollo de los cultivos y una mínima degradación ambiental (Topp *et al.*, 1997). 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 de la estructura, debido a que este parámetro gobierna tanto los aspectos relacionados con la compactación, como los vinculados con el almacenaje y movimiento de agua y aire (Reynolds *et al.*, 2002; Dexter, 2004).

Existe amplio consenso en identificar valores óptimos de parámetros tales como la densidad aparente, la porosidad, el contenido de carbono orgánico y la capacidad de retención de agua del suelo. Todos ellos pueden determinar la calidad física del suelo, con la finalidad de mejorar la productividad de los cultivos manteniendo a la vez la calidad ambiental (Reynolds *et al.*, 2002). Varios autores han determinado que la resistencia a la penetración es un parámetro más sensible que la densidad aparente para detectar los efectos de las prácticas de manejo

sobre el suelo (Bauder & Black, 1981; Hammel, 1989). El incremento en la impedancia mecánica del suelo bajo sistemas conservacionistas reduce el crecimiento de las raíces, con efectos negativos sobre el abastecimiento de agua y nutrientes por parte de los cultivos (Kirkegaard *et al.*, 1994). El objetivo del presente trabajo fue evaluar, en suelos representativos de la Región Pampeana Norte, parámetros de calidad física del suelo en sistemas agrícolas bajo siembra directa, en comparación con el mismo tipo de suelo en estado de máxima conservación, condición considerada prístina o quasi-prístina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales

Se realizó la caracterización física de suelos de once establecimientos correspondientes a ensayos de la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe ubicados en las provincias de Santa Fe, Córdoba y Buenos Aires entre los 32°17' y 34°10' latitud sur, y 61°02' y 63°00' longitud oeste (Figura 1) (García *et al.*, 2006). Los ensayos se establecieron en la campaña 2000/01 con maíz



Figura 1. Ubicación de los sitios experimentales de la Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. 1- Lambaré, 2- San Antonio, 3- La Hansa, 4- Santo Domingo, 5- La Marta, 6- La Blanca, 7- El Pilarcito, 8- La Lira, 9- San Alfredo, 10- Balducci, 11- El Fortín. (Adaptado de García *et al.*, 2006).

Figure 1. Location of the selected experimental sites of the Nutrition Network of CREA Southern Santa Fe. 1- Lambaré, 2- San Antonio, 3- La Hansa, 4- Santo Domingo, 5- La Marta, 6- La Blanca, 7- El Pilarcito, 8- La Lira, 9- San Alfredo, 10- Balducci, 11- El Fortín. (Adapted from García *et al.*, 2006).

como cultivo inicial, con las rotaciones Maíz-Trigo/Soja y Maíz-Soja-Trigo/Soja con diferentes combinaciones de aplicación de fertilizantes y un Testigo sin fertilizar, dispuestos en un diseño en bloques completos aleatorizados con tres repeticiones (García *et al.*, 2006). Los establecimientos abarcan un amplio rango de condiciones estructurales y texturales comúnmente encontradas en los principales suelos agrícolas de la región. La Tabla 1 muestra el listado de los sitios relevados con el tipo de suelo que corresponde a cada uno y la historia agrícola.

Muestreos y determinaciones

Los muestreos de suelo se realizaron entre los meses de diciembre 2002 y marzo 2003 en suelos cultivados y en situaciones adyacentes mantenidas en condición no disturbada o quasi-prístina las cuales fueron consideradas referencias no alteradas. En los sitios cultivados se extrajeron tres muestras compuestas de suelo en las parcelas sin tratamiento de fertilización (Testigo) pertenecientes a los ensayos establecidos por la Red de Nutrición CREA Sur de Santa Fe, considerando las siguientes profundidades: 0-0,08 m y 0,08 m hasta el límite inferior del horizonte Ap. Las situaciones quasi-prístinas eran montes muy antiguos, potreros de descanso sin presencia de animales por períodos prolongados, sectores próximos a tranqueras o alambrados antiguos. La comparación del suelo cultivado con una situación de referencia se planteó para observar la naturaleza y la extensión de los cambios en la calidad física del suelo.

La extracción de las muestras de suelo se realizó utilizando pala y eliminando las porciones laterales de suelo. El contenido de humedad del suelo al momento del muestreo osciló entre 140-180 g kg⁻¹ para los suelos de textura más suelta y 200-240 g kg⁻¹ para los de textura más fina. En el laboratorio, las muestras fueron desmenuzadas a mano, se secaron al aire y se tamizaron por un tamiz de 2 mm de malla. Se realizaron las siguientes determinaciones:

- a. Estabilidad estructural: Se obtuvo el porcentaje de agregados estables a los pre-tratamientos agua (Ea) y etanol (Ee) mediante el método de Hénin (1972). El método consiste en realizar el pre-tratamiento de la muestra con agua o etanol y posteriormente pesar la fracción de agregados que permanece en el tamiz de 0,25 mm luego de sumergir las muestras en agua con el aparato de Feóodoroff (1960). Se calculó la estabilidad relativa (ER), mediante la relación entre el porcentaje de agregados estables de cada situación y los del mismo suelo en su condición prístina, expresando el resultado en porcentaje (Orellana & Pilatti, 1994).
- b. Carbono orgánico total (COT): Se determinó por el método de Walkley-Black que consiste en la oxidación del carbono orgánico con dicromato de potasio en ácido sulfúrico concentrado durante 30 minutos, titulando luego el exceso del agente oxidante con sulfato amónico ferroso (Nelson & Sommers, 1982).
- c. Densidad aparente (DA): Se realizó por cada parcela la extracción de 6 muestras sin disturbar a los 0-0,05 m y 0,12-0,17 m de profundidad, utilizando un cilindro de 47,5 mm de altura y 60 mm de diámetro (Blake & Hartge, 1986).

Tabla 1. Establecimientos relevados, grupo CREA, clasificación taxonómica según el Soil Taxonomy, serie de suelo e historia agrícola de cada sitio (Adaptado de García *et al.*, 2006).

Table 1. Taxonomic classification (Soil Taxonomy), soil series and agricultural history from CREA sites under study (Adapted from García *et al.*, 2006).

Establecimiento	CREA	Clasificación taxonómica	Serie de suelo	Años agricultura
Santo Domingo	Monte Buey	Argiudol Típico	Monte Buey	5
La Hansa	Armstrong-Montes de Oca	Argiudol Ácuico	Bustinza	+ 20
San Antonio	Rosario	Argiudol Típico	Maciel	4
San Alfredo	Santa Isabel	Argiudol Típico	Hughes	8
El Pilarcito	María Teresa	Natralbol Típico	Cafferata	6
Lambaré	San Jorge-Las Rosas	Argiudol Típico	Los Cardos	12
Balducci	Teodelina	Hapludol Típico	Santa Isabel	+ 60
La Lira	La Cesira	Haplustol Éntico y Haplustol Údico	Canals y Leguizamón	4
La Marta	Canals	Haplustol Éntico	Canals	40
La Blanca	Gral. Baldissera	Hapludol Típico	La Bélgica	6
El Fortín	Gral. Arenales	Hapludol Típico	Santa Isabel	4

- d. Densidad del suelo máxima (DMAX): Se determinó por medio del Test Proctor (Proctor, 1933), según las normas de la AASHTO T-99 (American Association of State Highway Officials). Se utilizaron muestras de suelo tamizadas por 2 mm, se subdividieron en tres fracciones iguales y luego de humedecerlas (24 horas antes del análisis), se colocaron sucesivamente dentro del mortero (0,947 dm³ de capacidad). La compactación se realizó capa por capa, mediante 25 golpes de maza (2,5 kg de peso, lanzada a una altura de 0,305 m del nivel de la muestra). Con los valores de densidad y de humedad se trazó la curva de compactación correspondiente a cada muestra. Se calculó la compactación relativa (CR) dividiendo la DA actual por la DMAX determinada por el test Proctor, expresando el resultado en porcentaje (Soane *et al.*, 1981).
- e. Resistencia Mecánica (RM): Se utilizó un penetrómetro de anillo (Bradford, 1986) con las siguientes medidas de cono: 30° de ángulo, 40 mm de longitud y 21,5 mm de diámetro (CN-970, SOILTEST Inc., Lake Bluff, Illinois). Se realizaron 6 lecturas por parcela a intervalos de 0,05 m, desde la superficie hasta los 0,35 m de profundidad. Paralelamente con las lecturas de resistencia mecánica se extrajeron muestras de suelo utilizando un barreno para determinar el contenido de humedad por gravimetría (Gardner, 1986) en tres rangos de profundidad: 0-0,10 m; 0,10- 0,20 m y 0,20-0,30 m.

Análisis estadístico

Se realizaron las comparaciones para cada establecimiento por separado, teniendo en cuenta el suelo cultivado en comparación con el mismo tipo de suelo quasi-prístino. Los datos fueron analizados utilizando Statistical Analysis System (SAS Institute, 1990, Versión 6.12) mediante el procedimiento General Linear Model (GLM). La separación de medias fue obtenida por el test de Tukey, para las comparaciones múltiples, y mediante el test de Dunnett, para las comparaciones entre el suelo bajo cultivo y la situación quasi-prístina ($p \leq 0,05$).

RESULTADOS

Debido a la dispersión geográfica que presentan los establecimientos relevados se observan suelos de características texturales diferentes, con lo cual para el ordenamiento de los resultados se los agrupó en función del tipo de suelo. Así, se constituyó el Grupo I con suelos que pertenecen, según el Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2006), a los Grandes Grupos Argiudoles y Natralboles con un contenido de arcilla en superficie que oscila entre 215 y 265 g kg⁻¹, que incluye a los establecimientos Santo Domingo, La Hansa, San Antonio, San Alfredo, El Pilarcito y Lambaré. El Grupo II está conformado por los suelos pertenecientes a los Grandes Grupos Hapludoles y Haplusoles, que poseen entre 98 y 170 g kg⁻¹ de arcilla en su-

perficie, incluyendo a los establecimientos Balducci, La Lira, La Marta, La Blanca y El Fortín.

La proporción de agregados estables al agua de cada sitio cultivado y su relación con el mismo tipo de suelo en su condición quasi-prístina se muestra en la Tabla 2. En la mayoría de los casos hubo diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) entre la Ea de los suelos cultivados y la situación quasi-prístina. Los agregados estables al agua fueron, en superficie y profundidad, más elevados en los establecimientos San Alfredo, El Pilarcito y Lambaré (Grupo I). Los establecimientos Santo Domingo, La Hansa y San Antonio del Grupo I y todos los nucleados en el Grupo II, presentaron tanto en superficie como en profundidad valores inferiores al 12% (excepto La Hansa que en profundidad presentó un 16,7% de agregados estables al agua).

El análisis de agregados estables al pretratamiento con etanol muestra que los suelos se agruparon de la misma manera que en el pretratamiento con agua (Tabla 2). Hubo mayor Ee en los suelos quasi-prístinos que los suelos cultivados. Los establecimientos Santo Domingo, La Hansa y San Antonio del Grupo I y todo el Grupo II, presentaron, tanto en superficie como en profundidad, los valores más bajos de Ee.

Los contenidos de COT fueron en superficie y en profundidad siempre más bajos en los suelos cultivados que en los quasi-prístinos (Tabla 3). En la mayoría de los casos, estas diferencias fueron estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$). En el Grupo I, los establecimientos San Alfredo, El Pilarcito y Lambaré presentaron mayor porcentaje de COT, tanto en superficie como en profundidad que el resto, mientras que en el Grupo II ello sucedió en los establecimientos La Blanca y El Fortín, en ambas profundidades analizadas.

Las diferencias en contenido de COT entre cada suelo cultivado y la situación quasi-prístina seleccionada adyacente indicó el grado de reducción de carbono causado por el uso agrícola. Puede observarse que las reducciones de carbono en algunos casos son considerables, oscilando entre 10 y 44%, tanto en superficie como en profundidad (Tabla 3).

Las Figuras 2 y 3 muestran la relación directa entre porcentaje de agregados estables a los pre-tratamientos agua y etanol y el COT, respectivamente. La relación Ea-COT fue similar para los suelos de los Grupos I y II (Fig. 2), mientras que en el caso de la relación Ee-COT, los suelos del Grupo I tuvieron niveles más altos de Ee a similares concentraciones de COT (Fig. 3).

Los suelos nucleados en el Grupo I, en general, presentaron valores más bajos de DA y DMAX, en ambas profundidades de muestreo, con respecto al Grupo II

Tabla 2. Porcentaje de agregados estables al agua (Ea) y al etanol (Ee) en los diferentes establecimientos evaluados (cultivado), en el mismo tipo de suelo sin perturbar (quasi-prístino) y estabilidad relativa en superficie y en profundidad.

Table 2. Water and ethanol stable aggregates percentage (Ea and Ee, respectively) in the cropped plots from the trials studied and in the undisturbed soil (quasi-pristine), and relative stability in soil surface and the lower limit of Ap horizon.

Establecimiento	Agregados estables al agua (Ea) (%)		Estabilidad relativa (%)	Agregados estables al etanol (Ee) (%)		Estabilidad Relativa (%)
	Cultivado	Quasi-prístino		Cultivado	Quasi-prístino	
SANTO DOMINGO						
Superficie	10,6 b ^(*)	21,0 a	50,2	28,2	34,9	80,8
Profundidad	7,4 b	29,6 a	25,2	29,6	32,6	90,6
LA HANSA						
Superficie	9,5 b	32,4 a	29,3	39,6	56,2	70,4
Profundidad	16,7	26,0	64,2	49,6	63,1	78,6
SAN ANTONIO						
Superficie	6,8 b	29,3 a	23,2	32,8 b	41,9 a	78,3
Profundidad	10,2 b	26,1 a	39,1	42,9	47,8	89,8
SAN ALFREDO						
Superficie	24,3 b	46,5 a	52,3	50,1	56,8	88,3
Profundidad	21,6 b	38,1 a	56,7	51,7	54,3	95,2
EL PILARCITO						
Superficie	20,5 b	42,7 a	47,9	52,2	57,5	90,8
Profundidad	24,4	26,6	91,6	47,9	53,1	90,3
LAMBARÉ						
Superficie	18,6 b	42,0 a	44,4	49,0	53,6	91,4
Profundidad	17,3 b	46,4 a	37,4	64,9	68,0	95,4
BALDUCCI						
Superficie	5,0 b	20,5 a	24,6	11,8	16,8	70,0
Profundidad	2,6 b	15,5 a	20,8	10,5	14,0	74,9
LA LIRA						
Superficie	9,1 b	29,3 a	31,2	20,6 b	42,1 a	49,0
Profundidad	3,3 b	12,9 a	25,3	7,7 b	25,0 a	30,8
LA MARTA						
Superficie	5,3	10,1	52,8	6,9 b	11,5 a	59,7
Profundidad	3,7	7,0	52,4	4,9	6,9	70,3
LA BLANCA						
Superficie	11,4	23,4	48,9	13,8 b	33,7 a	41,0
Profundidad	9,5	11,0	86,4	15,8 b	18,4 a	86,1
EL FORTÍN						
Superficie	11,9	31,4	37,8	22,9 b	27,4 a	83,5
Profundidad	3,6 b	24,4 a	14,6	20,2	32,2	62,6

^(*)En cada establecimiento analizado, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$) para cada profundidad en Ea y Ee, respectivamente.

Tabla 3. Carbono orgánico en superficie y en profundidad en los diferentes establecimientos evaluados (cultivado) y en el mismo tipo de suelo sin perturbar (quasi-prístino). Reducción de carbono en el suelo cultivado en comparación con la situación quasi-prístina.

Table 3. Organic carbon in soil surface and the lower limit of Ap horizon in the cropped plots from the trials studied and in the undisturbed soil (quasi-pristine). Reduction of carbon from the cropped plot compared to the undisturbed soil.

Establecimiento	Carbono orgánico (g kg ⁻¹)		Reducción del carbono (%)
	Cultivado	Quasi-prístino	
SANTO DOMINGO			
Superficie	18,0 b (*)	25,6 a	29,7
Profundidad	12,7 b	15,6 a	18,6
LA HANSA			
Superficie	18,3 b	22,6 a	19,0
Profundidad	13,0	15,6	16,7
SAN ANTONIO			
Superficie	18,6 b	21,6 a	13,9
Profundidad	13,8	15,4	10,4
SAN ALFREDO			
Superficie	24,9 b	36,2 a	31,2
Profundidad	18,5 b	24,1 a	23,2
EL PILARCITO			
Superficie	23,1 b	36,2 a	36,2
Profundidad	17,0 b	24,1 a	29,5
LAMBARÉ			
Superficie	20,1 b	35,9 a	44,0
Profundidad	14,5 b	25,3 a	42,7
BALDUCCI			
Superficie	14,1 b	23,1 a	39,0
Profundidad	10,5 b	16,4 a	36,0
LA LIRA			
Superficie	15,5 b	17,7 a	12,4
Profundidad	10,6 b	14,0 a	24,3
LA MARTA			
Superficie	12,6 b	15,6 a	19,2
Profundidad	9,8	11,3	13,3
LA BLANCA			
Superficie	17,8 b	30,3 a	41,3
Profundidad	13,2 b	16,8 a	21,4
EL FORTÍN			
Superficie	19,2 b	32,8 a	41,5
Profundidad	14,1 b	22,0 a	35,9

(*)Para cada establecimiento analizado, letras distintas indican en cada profundidad diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$).

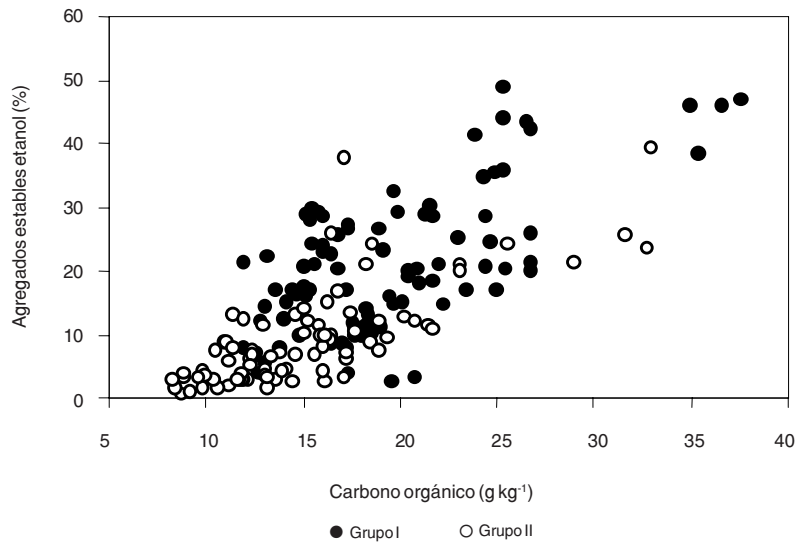


Figura 2. Relación entre el porcentaje de agregados estables al agua y el contenido de carbono orgánico en ambas profundidades de muestreo, para los suelos pertenecientes al Grupo I (Argiudoles y Natralbol) y Grupo II (Haplustoles y Hapludoles).

Figure 2. Relationship between water stable aggregate percentage and the organic carbon content in both sampling depths, for soils from the Group I (Argiudolls and Natralbolls) and Group II (Haplustolls and Hapludolls).

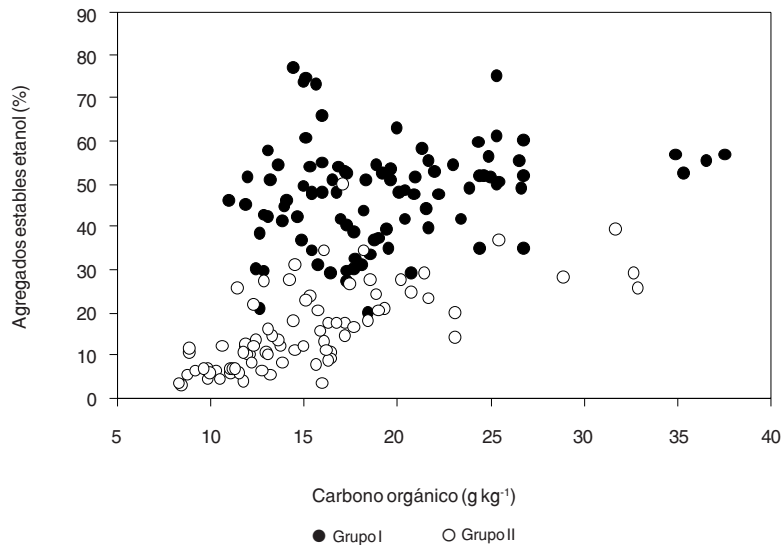


Figura 3. Relación entre el porcentaje de agregados estables al etanol y el contenido de carbono orgánico en ambas profundidades de muestreo, para los suelos pertenecientes al Grupo I (Argiudoles y Natralbol) y Grupo II (Haplustoles y Hapludoles).

Figure 3. Relationship between ethanol stable aggregate percentage and the organic carbon content in both sampling depths, for soils from the Group I (Argiudolls and Natralbolls) and Group II (Haplustolls and Hapludolls).

(Tabla 4). Por otra parte, los suelos cultivados presentaron valores superiores de DA y DMAX respecto al mismo suelo quasi-prístino, siendo estas diferencias en algunas situaciones estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$). Se halló una relación inversa entre DMAX y el COT (Fig. 4).

La resistencia a la penetración se agrupó en función de los resultados obtenidos en tres rangos: $< 1,5$ MPa, $1,5-2,0$ MPa, y $> 2,0$ MPa. En las parcelas bajo cultivo, dentro del Grupo I, únicamente los establecimientos El Pilarcito y Lambaré manifestaron valores de RM $< 1,5$ MPa, en el rango que oscila entre $1,5-2,0$ MPa se hallaron los establecimientos Santo Domingo, San Antonio y San Alfredo, mientras que el establecimiento La Hansa presentó valores superiores a $2,0$ MPa, llegando incluso a los $3,0$ MPa. Los establecimientos del Grupo II manifestaron el siguiente comportamiento: La Marta en los $0,10$ m superficiales presentó valores de RM inferiores a $1,5$ MPa, a partir de esta profundidad fue mayor a $1,5$ MPa. La Blanca, El Fortín y Balducci presentaron valores de RM superiores a $2,0$ MPa, llegando a los $3,0$ MPa. Para el caso del establecimiento La Lira, no se obtuvieron datos debido a la elevada RM que ofreció el suelo por encontrarse excesivamente seco.

Las mediciones de RM en el suelo quasi-prístino fueron inferiores a $1,5$ MPa y con diferencias estadísticamente significativas con respecto al respectivo suelo cultivado en los sitios La Hansa, San Antonio, San Alfredo, Lambaré, Balducci, La Blanca y El Fortín. En Santo Domingo y El Fortín, la RM bajo cultivo superó al quasi-prístino hasta $0,15$ y $0,20$ m de profundidad, respectivamente. Para el caso de La Marta, no hubo diferencias con respecto al quasi-prístino desde la superficie hasta $0,20$ m; a partir de esa profundidad los valores de RM en el suelo cultivado fueron mayores. En El Pilarcito, el suelo cultivado presentó mayor RM entre $0,10$ y $0,20$ m con respecto al suelo quasi-prístino. No se hallaron diferencias significativas en el contenido de humedad entre el suelo cultivado y la situación quasi-prístina.

DISCUSIÓN

Mediante la técnica de estabilidad estructural se pueden evaluar varios aspectos relacionados al suelo, ya que a través de la misma se tiene en cuenta la porosidad (macro y microporosidad), el carbono orgánico y la actividad biológica, desde el punto de vista de la generación de poros y de la humificación de la materia orgánica (Reynolds *et al.*, 2002; Dexter, 2004).

El pretratamiento con agua permite evaluar la presencia de macroporos, esto es debido al fenómeno de esta-

llido que se produce al sumergir los agregados en agua, de manera que el aire queda atrapado en el interior del agregado. Si no hay macroporos suficientes como para dar lugar a la salida del aire atrapado, se produce el estallido (Orellana & Pilatti, 1994). El pretratamiento con etanol mide la cohesión de los agregados, es decir la mayor o menor fragilidad que presentan, aportada por el contenido de arcilla y materia orgánica. El hecho de sumergir los agregados en un líquido con propiedades como el etanol permite la salida del aire atrapado en el interior del agregado, suprimiendo el fenómeno de estallido. La destrucción de los agregados, se debe en este caso al fenómeno de hinchamiento del complejo arcillo-húmico (Orellana & Pilatti, 1994; Gomez *et al.*, 2001).

Analizando los datos de Ea y Ee en el suelo cultivado de los establecimientos Santo Domingo, La Hansa y San Antonio, pertenecientes al Grupo I, se observó tanto en superficie como en profundidad valores de Ea y Ee bajos, en relación al resto de los suelos de este grupo (Tabla 2). La textura del horizonte superficial en estos tres casos es franco-limosa con $210-240$ g kg⁻¹ de arcilla, con lo cual podrían generarse macroporos estables como resultado de una buena estructuración y generación de canales por actividad biológica. En estos tres establecimientos, el factor que determinó el estallido y la falta de cohesión pudo haber sido fundamentalmente la desestabilización de agregados por la degradación y/o pulverización de los materiales como consecuencia de manejos previos y la menor proporción de COT (en promedio fue 18 y 13 g kg⁻¹ para superficie y profundidad, respectivamente). En cambio, los suelos cultivados de los establecimientos San Alfredo, El Pilarcito y Lambaré presentaron mayor Ea y Ee. En estos sitios, los valores del pretratamiento con etanol fueron muy similares a la situación quasi-prístina. Estos suelos presentan 250 g kg⁻¹ de arcilla en superficie y un COT que fluctuó entre 20 y 25 g kg⁻¹ (Tabla 3).

Para el Grupo II, los datos de Ea y Ee en los suelos cultivados fueron, tanto en superficie como en profundidad, muy bajos (Tabla 2). La textura en superficie de estos suelos es franco arenosa -franco limosa con aproximadamente $800-850$ g kg⁻¹ de la fracción mineral constituida por limo y arenas finas- muy finas. Estas partículas minerales no favorecen una agregación estable, factor que no contribuye a aumentar la Ea. Por otra parte, el reducido porcentaje de arcilla y la baja proporción de COT no permitieron una elevada cohesión de los agregados, fenómeno manifestado a través de los datos de Ee.

Suelos con deficiente formación de grietas, bioporos o macroestructura producida por el manejo, es decir una reducida proporción de macroporos de diferente origen, tienen características de pobre calidad física (Guérif *et al.*, 2001). Trabajos realizados por Richard *et al.*, (2002)

Tabla 4. Densidad aparente (DA), Densidad aparente máxima (DMAX) y Compactación Relativa (CR) a los 0 - 0,05 m y 0,12 - 0,17 m de profundidad, para los establecimientos evaluados (cultivado) y el mismo tipo de suelo sin perturbar (quasi-prístino).
 Table 4. Bulk density (DA), maximum bulk density (DMAX) and relative compaction (CR) in the 0 - 0.05 m and 0.12 - 0.17 m soil layers, in the cropped plots from the trials studied and in the undisturbed soil (quasi-pristine).

Establecimiento	DA (Mg m ⁻³)		DMAX (Mg m ⁻³)		CR (%)	
	Cultivado	Quasi-prístino	Cultivado	Quasi-prístino	Cultivado	Quasi-prístino
SANTO DOMINGO						
0 - 0,05 m	1,35 a (*)	0,95 b	1,49	1,38	90,3 a	68,4 b
0,12 - 0,17 m	1,35	1,32	1,51	1,50	89,7	88,0
LA HANSA						
0 - 0,05 m	1,21	1,15	1,40	1,37	86,6	83,5
0,12 - 0,17 m	1,36	1,32	1,44	1,44	94,2	91,2
SAN ANTONIO						
0 - 0,05 m	1,28 a	1,05 b	1,41	1,39	90,7 a	75,7 b
0,12 - 0,17 m	1,32 a	1,21 b	1,48	1,47	89,5 a	81,4 b
SAN ALFREDO						
0 - 0,05 m	1,32 a	1,15 b	1,45	1,39	91,1 a	83,0 b
0,12 - 0,17 m	1,43 a	1,31 b	1,51	1,49	94,6 a	87,8 b
EL PILARCITO						
0 - 0,05 m	1,40	1,30	1,54	1,50	90,6	86,6
0,12 - 0,17 m	1,41	1,38	1,57	1,52	89,9	90,7
LAMBARÉ						
0 - 0,05 m	1,17	1,05	1,39	1,31	84,1	81,2
0,12 - 0,17 m	1,28 a	1,06 b	1,45	1,36	88,2 a	81,3 b
BALDUCCI						
0 - 0,05 m	1,37 a	1,04 b	1,53	1,44	89,5 a	72,2 b
0,12 - 0,17 m	1,50 a	1,23 b	1,57	1,55	95,1 a	79,2 b
LA LIRA						
0 - 0,05 m	1,43	1,42	1,60	1,58	89,5	89,9
0,12 - 0,17 m	1,48	1,47	1,62	1,59	91,2	92,6
LA MARTA						
0 - 0,05 m	1,39	1,33	1,62	1,56	86,0	84,9
0,12 - 0,17 m	1,43	1,40	1,66	1,62	86,4	86,7
LA BLANCA						
0 - 0,05 m	1,26 a	1,12 b	1,54	1,40	81,1	79,9
0,12 - 0,17 m	1,34 a	1,29 b	1,56	1,52	85,8	84,7
EL FORTÍN						
0 - 0,05 m	1,40 a	1,20 b	1,51	1,42	92,3 a	83,9 b
0,12 - 0,17 m	1,46	1,43	1,54	1,55	94,3	92,2

(*) Para cada establecimiento y profundidad analizados, letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas ($p \leq 0,05$), en DA y CR, respectivamente.

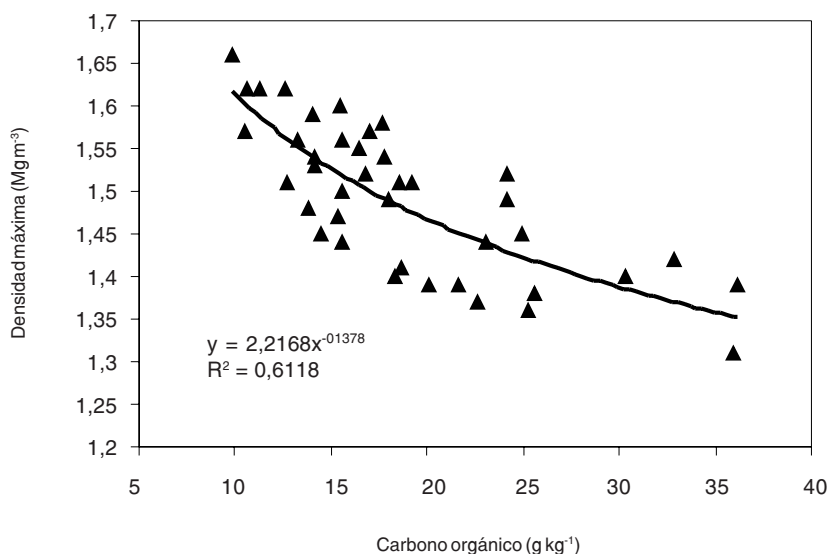


Figura 4. Relación entre el contenido de carbono orgánico del suelo y la densidad aparente máxima en superficie y en profundidad en los diferentes establecimientos evaluados (suelo cultivado) y en el mismo tipo de suelo sin perturbar (quasi-prístino).

Figure 4. Relationship between organic carbon content and maximum bulk density in both sampling depths, in the cropped plots from the trials studied and in the undisturbed soil (quasi-pristine).

y Dexter (2004) sobre suelos de texturas franca y franco-limosa, demostraron que cuando los poros de mayor tamaño son destruidos por prácticas de manejo se produce un incremento de los poros de menor tamaño con lo cual se ve afectada la calidad física de los suelos.

En estudios realizados sobre Argiudoles Vérticos, Gomez *et al.*, (2001), hallaron mayor estabilidad de los agregados en los sitios no perturbados en comparación con el mismo tipo de suelo alterado por la actividad agrícola. El incremento en la estabilidad estructural en situaciones vírgenes, es atribuido a la intensificación de las fuerzas de cohesión entre partículas minerales y orgánicas como consecuencia de un mayor porcentaje de la fracción orgánica humificada.

La relación entre E_a y COT pone de manifiesto que en la medida que aumenta el COT, se incrementa la estabilidad de los agregados. Los suelos con valores bajos de COT (< 18 g kg⁻¹) presentaron porcentajes de agregados estables al agua inferiores al 10%, independientemente del grupo al cual pertenezcan, es decir que la textura en este caso no fue el factor determinante (Fig. 2). Cabe destacar que los sitios del Grupo I que aparecen en esta franja son Santo Domingo, La Hansa y San Anto-

nio. En cambio, cuando se plantea la relación entre E_e y COT, se observa una separación bastante neta entre los dos grupos de suelos, los Hapludoles y Haplustoles se extienden básicamente entre 8 y 20 g kg⁻¹ de COT con un porcentaje de agregados estables al etanol que no supera el 30% (Fig. 3). La E_e evalúa la cohesión otorgada por un mayor contenido de arcilla y COT, situación que se observa en los suelos del Grupo I. Sin embargo, se presentan casos que dan valores intermedios de E_e (Santo Domingo, La Hansa y San Antonio), pero cuando se realiza el pre-tratamiento con agua pierden fácilmente la cohesión, con lo cual se manifiesta una baja E_a .

Gomez *et al.* (2001) hallaron una correlación negativa ($R^2 = 0,84$) entre el índice de inestabilidad y la fracción de carbono humificado de suelos bajo cultivo y situaciones vírgenes. En las situaciones en que se manifestó deterioro de la estructura (mayor índice de inestabilidad estructural), la proporción de carbono humificado fue menor.

Kay (1990) introduce el término vulnerabilidad estructural para caracterizar la incapacidad de los suelos de hacer frente a situaciones de estrés. Un suelo puede ser vulnerable debido a una baja estabilidad estructural, es decir que no posee capacidad para resistir una degrada-

ción estructural inmediata cuando se aplica una fuerza disruptiva como, por ejemplo, el laboreo. No obstante, la vulnerabilidad puede deberse a una baja resiliencia, es decir cierta incapacidad de recuperar su estructura original.

La estabilidad relativa provee información respecto al estado del suelo en comparación con la condición óptima. Para analizar la ER es importante distinguir como influye la agregación que aporta la materia orgánica, como factor de unión de partículas primarias generando un equilibrio en la distribución del tamaño de los poros, efecto que se pone en evidencia en los valores obtenidos en la situación quasi-prístina, además del contenido de arcilla. La utilidad de este dato radica en que se puede comparar la estabilidad estructural de suelos de una región con diferente composición textural y orgánica. La importancia de establecer valores críticos o valores guías de estabilidad para un tipo de suelo, redundando en proveer información a partir de la cual sea posible diagnosticar la necesidad de introducir manejos recuperadores de suelo (Orellana & Pilatti, 1994).

Existe consenso en documentar procesos de degradación de los suelos como consecuencia del laboreo (Díaz Zorita & Grosso, 2000; Díaz Zorita *et al.*, 2002; Reynolds *et al.*, 2002). Las diferentes prácticas de manejo pueden estimular el potencial oxidativo de las poblaciones microbianas como consecuencia de la remoción del suelo y la decobertura. Al incrementar la respiración de los organismos edáficos se provoca una aceleración de la descomposición de las fracciones orgánicas, liberando la materia orgánica protegida físicamente, como consecuencia de la ruptura de los agregados (Ferrerías *et al.*, 2001; Gomez *et al.*, 2001). Independientemente de la historia agrícola de cada sitio evaluado, se produjo una importante disminución de la cantidad de COT con respecto al mismo tipo de suelo no perturbado. Las diferencias en los valores de reducción de carbono pueden atribuirse a la composición original de cada sitio y a las condiciones de mayor o menor oxidación que se presentaron. En los sistemas agrícolas, generalmente, las pérdidas por oxidación y en algunas situaciones por erosión no fueron compensadas por las ganancias de carbono a través de la fijación y estabilización.

Los valores de DA fueron más elevados bajo cultivo que en el suelo quasi-prístino. Los resultados coinciden con Reynolds *et al.* (2002), quienes hallaron mayor densidad aparente y menor proporción de carbono orgánico en suelos de diferente textura y estados estructurales bajo labranza convencional y siembra directa en comparación con situaciones no cultivadas o suelos vírgenes.

Hubo algunos sitios del Grupo I en los cuales la DA presentó valores que pudieron afectar el normal crecimiento de raíces. Jones (1983) distingue para suelos de diferente textura un umbral o "valor crítico menor" de

densidad aparente por debajo del cual el crecimiento radicular no es impedido. En función de las clases texturales, surgen para suelos con un rango de limo+arcilla del 90% al 10%, valores que fluctúan entre 1,2-1,6 Mg m³, respectivamente. Por otra parte, para esas mismas proporciones de arcilla, limo y arena, determina el "valor crítico superior" que oscila entre 1,4 y 1,8 Mg m³, cuando la densidad aparente del suelo supera dicho valor, el crecimiento de las raíces se ve severamente impedido.

La susceptibilidad a la compactación o la vulnerabilidad que presenta un suelo a la compactación, depende de factores inherentes al suelo, clima y prácticas de manejo. La máxima compactación que puede alcanzar un suelo está fuertemente relacionada con la presencia de partículas minerales de menor tamaño, con la retención de agua a bajos potenciales mátricos y con el contenido de materia orgánica. Varios autores concluyen que la materia orgánica tiene mayor incidencia sobre la DMAX que la composición mineral de los suelos (Díaz Zorita & Grosso, 2000). En los suelos estudiados, también se observó una disminución de la máxima compactación en la medida que se incrementó el COT, puesta de manifiesto a través de la relación inversa que hubo entre COT y DMAX (Fig. 4). La presencia de materia orgánica tiene un efecto protector frente a la compactación. La adsorción de compuestos orgánicos humificados a la superficie de las arcillas aumenta la porosidad intra-agregados (porosidad textural) para constituir el complejo arcillo-húmico, modificando el comportamiento global de los suelos frente a la compactación y a las propiedades de retención de agua (Ferrerías *et al.*, 2001; Guérif *et al.*, 2001).

La CR surge de realizar el cociente entre la densidad aparente obtenida en cada sitio y la densidad máxima obtenida por el test Proctor, expresada en porcentaje. La utilidad de este dato radica en la posibilidad de realizar comparaciones del estado de compactación de diferentes suelos y prácticas de manejo (Micucci & Taboada, 2006). Si los valores de compactación relativa son muy elevados (cerca del 90%) significa que el suelo está muy cerca de la máxima compactación que puede admitir, con una severa disminución de los poros de mayor tamaño, afectando al crecimiento de los cultivos. Los datos muestran que en los establecimientos Santo Domingo, San Antonio, San Alfredo, Balducci y El Fortín, la CR hallada en el suelo cultivado fue superior al 90%, mientras que en el suelo quasi-prístino fue significativamente menor. Los datos obtenidos en los sitios considerados como referencia sin alteración por el cultivo, en todos los casos, fueron inferiores al valor obtenido en el sector bajo cultivo. La actividad agrícola, fundamentalmente bajo siembra directa incide sobre la compactación de los suelos. La ausencia de remoción del suelo puede provocar una disminución de los macroporos, incrementando

la CR del suelo, con un impacto directo sobre el normal movimiento de fluidos. Ferreras *et al.* (2001), en estudios realizados sobre Argiudoles bajo siembra directa, labranza vertical y suelo virgen, hallaron una relación inversa ($R^2 = 0,869$) entre la proporción de macroporos (porosidad estructural) y CR.

Para asegurar un buen crecimiento y funcionamiento de las raíces, es necesario que el suelo provea una adecuada capacidad de almacenaje de agua y aire, y además una resistencia o densidad apropiada. Valores de RM inferiores a 1,5 MPa no ofrecen resistencia alguna para un adecuado desarrollo radicular. Cuando la RM es mayor a 2,0 MPa se ve afectado el crecimiento de las raíces y el abastecimiento de agua y nutrientes (Gupta & Allmaras, 1987; Hamblin, 1985). Los sitios La Hansa, Balducci, La Blanca y El Fortín fueron los que expresaron valores superiores a 2,0 MPa y, paralelamente, manifestaron una baja estabilidad al agua y al etanol, así como menor proporción de COT. Kirkegaard *et al.* (1994) han determinado que la RM puede ser más sensible que la densidad aparente para detectar los efectos de las prácticas de manejo sobre el suelo. En nuestras evaluaciones, se presentaron algunas situaciones que coinciden con estos autores. El caso de los establecimientos San Alfredo y El Pilarcito que manifestaron valores de RM inferiores al umbral de 2,0 MPa, presentaron DA elevada tanto en superficie como en profundidad (1,32-1,43 Mg m⁻³ y 1,40-1,41 Mg m⁻³, respectivamente). Por otra parte, La Hansa y La Blanca presentaron elevada RM (> 2,0 MPa), mientras que la DA no alcanzó los valores considerados críticos.

CONCLUSIONES

En todas las situaciones analizadas, los sitios considerados como referencia (situación quasi-prístina) presentaron mejores condiciones estructurales, mayor proporción de COT y menor compactación con respecto al mismo suelo bajo cultivo.

Los sitios San Alfredo, El Pilarcito y Lambaré presentaron la mayor concentración de carbono orgánico y mayor estabilidad al agua y al etanol en ambas profundidades analizadas.

Los suelos de textura más gruesa, pertenecientes al Grupo II, presentaron, en general, menor proporción de carbono orgánico y menor estabilidad a los pretratamientos agua y etanol.

La CR en el suelo bajo cultivo fue elevada en todos los establecimientos analizados.

Los establecimientos La Hansa, Balducci, La Blanca y El Fortín presentaron valores de RM superiores 2,0 MPa, que pueden afectar el crecimiento de las raíces y el abastecimiento de agua y nutrientes.

Las pérdidas de carbono orgánico y la inestabilidad estructural aumentaron la susceptibilidad a la compactación de los suelos.

Haciendo un ordenamiento de los suelos del Grupo I se concluye que los establecimientos San Alfredo, El Pilarcito y Lambaré manifestaron mejores características de estructuración y menor resistencia a la penetración, por lo tanto un mejor comportamiento frente a los factores que inciden sobre la degradación. Cabe destacar que estos establecimientos presentaron una historia agrícola relativamente breve. Por otra parte, el sitio La Hansa cuya historia agrícola asciende a más de 20 años, presentó menor estabilidad estructural y COT, como así también elevada RM.

Los sitios Balducci, La Marta y La Lira del Grupo II, presentaron las condiciones menos favorables en cuanto a estabilidad estructural y condiciones de excesiva compactación. En los casos Balducci y La Marta coinciden con una prolongada historia agrícola con más de 60 y 40 años, respectivamente.

Los indicadores de fertilidad física más sensibles o los que aportaron en este relevamiento más información, son el porcentaje de agregados estables a los pretratamientos agua y etanol.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen por su colaboración al Ing. Agr. Miguel Boxler, a los encargados de los establecimientos estudiados y a los señores Ariel Cichitti, Cristian Morganti y Juan Pablo Folguera. La red de Nutrición Sur de Santa Fe es una iniciativa de la Región CREA Sur de Santa Fe, con la colaboración de IPNI Cono Sur y el apoyo financiero de Agroservicios Pampeanos (ASP), nuestro agradecimiento a estas organizaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Bauder, A & AL Black. 1981. Soil carbon, nitrogen, and bulk density comparisons in two cropland tillage systems after 25 years and in virgin grassland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1166-1170.
- Bezdicke, DF; RI Papendick & L Lal. 1996. Introduction: Importance of soil quality to health and sustainable land management. *In: Methods for Assessing Soil Quality* (JW Doran & AJ Jons, ed.). ASA, Madison, WI, p.1-8.
- Blake, GR & KH Hartge. 1986. Bulk density. *In: A Klute (ed.) Methods of soil analysis, Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, Agronomy 9: 363-375.*
- Bradford, JM. 1986. Penetrability. *In: A Klute (ed.) Methods of soil analysis, Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, Agronomy 9: 463-478.*
- Buschiazzo, DE; JL Panigatti & PW Unger. 1998. Tillage effects on soil properties and crop production in the subhumid and semiarid Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 49: 105-116.

- Dexter, AR. 2004. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Díaz-Zorita, M & GA Grosso. 2000. Soil water related properties and the compactability of soils from the Pampean region of Argentina. *Soil Till. Res.* 54: 121-126.
- Díaz-Zorita, M; GA Duarte & JH Grove. 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: 1-18.
- Doran, JW & MR Zeiss. 2000. Soil quality response to long-term nutrient and crop management on a semi-arid Inceptisol. *Appl. Soil Ecol.* 15: 3-11.
- Fabrizzi, KP; FO García; JL Costa & LI Picone. 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: 57-69.
- Feódoroff, A. 1960. Nouvelles normes pour l'appareil à tamiser. *Ann. Agron.* 11: 651-655.
- Ferreras, LA; JL Costa; FO García & C Pecorari. 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: 31-39.
- Ferreras, LA; JJ De Battista; A Ausilio & CA Pecorari. 2001. Parámetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesq. Agropec. Brasileira* 36: 61-170.
- Franzluebbers, AJ; GW Langdale & HHSchomberg. 1999. Soil carbon, nitrogen, and aggregation in response to type and frequency of tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 349-355.
- García, FO; MBoxler; JMinteguiaga; R Pozzi; L Firpo; G Deza Marín & A Berardo. 2006. La Red de Nutrición de la Región CREA Sur de Santa Fe. Resultados y conclusiones de los primeros seis años. AACREA (Ed.), 32pp.
- Gardner, WH. 1986. Water content. In: Methods of soil analysis, (A Klute ed.). Part 1. 2nd ed. *Agronomy* 9: 493-544.
- Gil-Sotres, F; C Trasar-Cepeda; MC Leirós & S Seoane. 2005. Different approaches to evaluating soil quality using biochemical properties. *Soil Biol. Biochem.* 37: 877-887.
- Gomez, E; LA Ferreras; S Toresani; A Ausilio & V Bisaro. 2001. Changes in some soil properties in a vertic soil under short-term conservation tillage. *Soil Till. Res.* 61: 179-186.
- Guérif, J; G Richard; CDürr; JM Machet; S Recous & J Roger-Estrade. 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Till. Res.* 61: 13-32.
- Gupta, SC & RR Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: 65-100.
- Hamblin, AP. 1985. The influence of soil structure on water movement, crop root growth and water uptake. *Adv. Agron.* 38: 95-158.
- Hammel, JE. 1989. Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in northern Idaho. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 53: 1515-1519.
- Hénin, S; R Gras & G Monnier. 1972. El perfil cultural. El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Mundi Prensa. Madrid.
- Jones, CA. 1983. Effects of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 1208-1211.
- Kay, BD. 1990. Rates of change of soil structure under different cropping systems. In: Stewart BA (ed.), *Adv. Soil Sci.* 12: 1-52.
- Kirkegaard, JA; JF Angus; PA Gardner & WM Muller. 1994. Reduced growth and yield of wheat with conservation cropping. I. Field studies in the first year of the cropping phase. *Austr. J. Agric. Res.* 45: 511-528.
- Martens, DA & WT Frankenberger. 1992. Decomposition of bacterial polymers in soil and their influence on soil structure. *Biol. Fertil. Soils.* 13: 65-73.
- Micucci, F & MA Taboada. 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: 152-162.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties. AL Page; RH Mille & DR Keeney (eds.). American Society of Agronomy Madison, WI, USA, pp. 539-577.
- Orellana, de JA & MA Pilatti. 1994. La estabilidad de agregados como indicador edáfico de sostenibilidad. *Ciencia del Suelo* 12: 75-80.
- Pankhurst, CE; BG Hawke; HJ McDonald; CA Kirby; JC Buckerfield; P Michelsen; KA O'Brien; VVR Gupta & BM Doube. 1995. Evaluation of soil biological properties as potential bioindicators of soil health. *Austr. J. Agric. Res.* 35: 1015-1028.
- Proctor, RR. 1933. Fundamental principles of soil compaction. Engineering New Record, v11 p. 246.
- Reynolds, WD; BT Bowman; CF Drury; CS Tana & X Lu. 2002. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. *Geoderma* 110: 131-146.
- Richard, G; ICousin; JF Sillon; A Bruand & J Guérif. 2001. Effect of compaction on the porosity of a silty soil: influence on unsaturated hydraulic properties. *Eur. J. Soil Sci.* 52: 49-58.
- Salinas-García, JR; FM Hons & JE Matocha. 1997. Long-term effects of tillage and fertilization on soil organic matter dynamics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 152-159.
- SAS Institute. 1990. SAS/STAT user's guide. Statistics version. Vol. 2. 6th ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC.
- Schjønnig P & KJ Rasmussen. 2000. Soil strength and soil pore characteristics for direct drilled and ploughed soils. *Soil Till. Res.* 57: 69-82.
- Soane, BD; PS Blackwell; JW Dickson & DJ Painter. 1981. Compaction by agricultural vehicles: A review. 1. Soil and wheel characteristics. *Soil Till. Res.* 1: 207-237.
- Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil taxonomy. 10th Edition. USDA. NRCS, Washington DC. 341pp.
- Topp, GC; WD Reynolds; FJ Cook; JM Kirby & MR Carter. 1997. Physical attributes of soil quality. In: EG Gregorich & MR Carter (eds.). Soil quality for crop production and ecosystem health. Developments in Soil Science, Elsevier, NY, 25: 21-58.
- Urricariet, S & RS Lavado. 1999. Indicadores de deterioro en suelos de la Pampa Ondulada. *Ciencia del Suelo* 17: 37-44.