

# EFFECTO DE LA SIEMBRA DIRECTA CONTINUA SOBRE EL COMPORTAMIENTO FÍSICO-FUNCIONAL DE LOS SUELOS FRANCO LIMOSOS DE LA REGIÓN SEMIÁRIDA CENTRAL DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA (ARGENTINA)

Effect of Continuous Zero Tillage on the Physical-Functional Behavior of Silty Loam Soils of the Semiarid Central Region of the Province of Córdoba (Argentina)

Adriana Ana del Carmen Rollán<sup>1‡</sup> y Omar Antonio Bachmeier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba Argentina. Av. Valparaíso s/n Ciudad Universitaria. 5000 Córdoba, Argentina.

<sup>‡</sup> Autor responsable (arollan@agro.unc.edu.ar)

---

## RESUMEN

Los suelos franco-limosos se caracterizan por su susceptibilidad a compactarse formando estructuras masivas y homogéneas. El uso de la siembra directa (SD) genera la necesidad de estudiar nuevos aspectos de la degradación física de este tipo de suelos. Por ello, el objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto de la SD continua sobre el comportamiento físico y funcional de los suelos franco-limosos de la región semiárida central de la provincia de Córdoba (Argentina). Se determinó el contenido de carbono orgánico (CO), la distribución del tamaño de partículas, la densidad aparente (Dap), la densidad real y la conductividad hidráulica a saturación ( $K_{sat}$ ) de 0 a 7 (Prof.1) y de 7 a 14 cm (Prof. 2). El CO de la Prof.1 duplicó a los valores medidos de la Prof.2. La Dap de la Prof.2 fue hasta 20% superior a los correspondientes a la Prof.1. La disminución de los flujos estacionarios en los sitios con menor porosidad, muestran el grado en que los procesos de compactación afectan el movimiento del agua en el suelo e indican la dominancia de los macroporos durante el flujo saturado. En la mayoría de los casos los valores más altos de  $K_{sat}$  estuvieron asociados a los menores valores de Dap. La SD continua afectó las características físicas y funcionales de los suelos franco-limosos estudiados. Desde el punto de vista físico la estratificación del CO no compensó la densificación inducida por el sistema de labranza. Desde el punto de vista funcional, la compactación provoca cambios en las propiedades hidráulicas de 0 a 14 cm de profundidad.

**Palabras clave:** porosidad; compactación; densidad aparente; conductividad hidráulica.

## SUMMARY

The silty loam soils are characterized by susceptibility to compaction and forming massive homogeneous structures. The use of zero tillage practices (SD) requires exploring new aspects of physical degradation of these soils. Therefore, the aim of this study was to evaluate the effect of continuous SD on the physical-functional behavior of silty loam soils of the semiarid central region of the province of Córdoba (Argentina). Content of organic carbon (OC), particle size distribution, bulk density (Db), particle density and saturated hydraulic conductivity (Ksat) from 0 - 7 (Prof.1) and 7 - 14 cm (Prof.2) were measured. The average silt content was 54 %. In most cases, Prof.1 OC doubled the measured values in Prof.2. Bulk density values of Prof.2 were up to 20 % higher than those for the Prof.1. The decrease in the steady state flow of lower porosity sites shows that the degree of compaction processes affects movement of water in the soil and may indicate dominance of macropores in the saturated water flow. In most cases, higher values of Ksat were associated with the lowest values of Db; this behavior was not widespread. Continuous SD affected the physical and functional characteristics of the silty loam soils studied. From a physical standpoint, stratification of OC did not offset the densification induced by the tillage system. From the functional point of view, compaction causes changes in soil hydraulic properties 0-14 cm deep.

**Index words:** soil porosity; compaction; bulk density; hydraulic conductivity.

## INTRODUCCIÓN

La aplicación de técnicas inapropiadas de labranza del suelo conducen a un acelerado deterioro de sus propiedades físicas, químicas y biológicas, lo que lleva a reducir la productividad a largo plazo y provoca un deterioro del medio ambiente (Oosterheld, 2008).

Para reducir este efecto, en los últimos 30 años se ha dado un aumento en las prácticas agrícolas que se inclinan a manejos de no labranza o siembra directa (SD) sobre la base de que esta forma de producción de cultivos resulta eficiente en relación a la productividad y conservación del suelo.

La FAO realiza y publica continuamente informes sobre la adopción global de la agricultura conservacionista. La SD se practica actualmente en alrededor de 95 millones de hectáreas en el mundo: aproximadamente 47% de esta superficie corresponde a América Latina, 39% a Estados Unidos, 9% a Australia y cerca de 3.9% a Europa, Asia y África (Derpsch, 2011).

En Argentina, la combinación de políticas de mercado y manejos ambientales conservacionistas ha ampliado la superficie de tierras agrícolas bajo siembra directa (Bongiovanni y Lobartini, 2006; Bono *et al.*, 2008; Duval *et al.*, 2013). Sin embargo, diversos estudios locales que evalúan los efectos inducidos por el cambio en las prácticas de labranza –de tradicional a SD– (Álvarez, 2013; Rollán y Bachmeier, 2013), alertan sobre la importancia de no exacerbar las bondades de la SD.

El contenido de materia orgánica, la textura y el grado de deterioro presente al momento de la implementación del sistema de labranza, regulan el impacto de la técnica sobre el medio edáfico (Dexter, 2004a; Cholaky *et al.*, 2010; Rollán y Bachmeier, 2014). Estas características físicas y químicas, así como la intensidad de uso del suelo, actúan como factores determinantes del equilibrio que en condiciones de SD se alcanzará a largo plazo. En ambientes semiáridos, donde la labranza convencional ha afectado de manera significativa la resiliencia del proceso de humificación (Romero *et al.*, 2014), las prácticas conservacionistas y la no remoción (SD) no alcanzan a revertir el proceso de degradación física del suelo (Parra *et al.*, 2011; Lal, 2014).

Los suelos no son sistemas rígidos y los esfuerzos mecánicos locales pueden modificar la geometría del espacio poroso. Estas modificaciones se asocian con

una destrucción simultánea, reducción, cambios y generación de nuevos poros (Mualem, 1984).

El efecto de la SD sobre el comportamiento físico y mecánico de los suelos limosos y franco-limosos ha sido estudiado por varios autores (Guerif *et al.*, 2001; Cosentino y Pecorari, 2002; Taboada *et al.*, 2004; Hubert *et al.*, 2007; Álvarez *et al.*, 2009; Dal Ferro *et al.*, 2014; Guzmán *et al.*, 2014). La mayoría de los trabajos publicados señalan que los suelos franco-limosos se caracterizan por su susceptibilidad a compactarse formando estructuras masivas y homogéneas (Álvarez, 2013; Lars *et al.*, 2013). Además, en sitios con larga historia agrícola se asocian con bajos contenidos de materia orgánica, pobre estabilidad de agregados y reducida capacidad de infiltración (Sanzano *et al.*, 2005; Soracco *et al.*, 2008; Manso *et al.*, 2012; Rollán y Bachmeier, 2014), condiciones que se acentúan en aquellos lotes donde la siembra directa (SD) continua se combina con la simplificación de la secuencias de cultivos (Lars *et al.*, 2013), como sucede en algunas regiones del área central de la provincia de Córdoba con el monocultivo de soja.

Los efectos de la SD continua sobre el medio físico tienen que ser considerados en los procesos de transporte de agua y nutrientes. Bajo condiciones de SD los suelos franco limosos muestran menor macroporosidad y en concordancia, para esas condiciones, se determinan mayores valores de densidad aparente (Manso *et al.*, 2012; Rollán y Bachmeier, 2013).

El aumento de la densidad aparente y la pérdida de porosidad afectan la conductividad hidráulica del suelo, parámetro esencial en la determinación cuantitativa del movimiento del agua sobre la base de que el flujo y los procesos de transporte dependen de las propiedades geométricas de los poros (Sasal *et al.*, 2006; Moretand Arru'e, 2007; Soracco *et al.*, 2010).

Existe acabada evidencia experimental que demuestra que la SD continua modifica las propiedades físicas: la estructura, la densidad aparente, la distribución de poros, la dinámica del agua y la resistencia a la penetración, lo que incide sobre el volumen de exploración de raíces y el movimiento de agua y aire (Sanzano *et al.*, 2005; Strudley *et al.*, 2008; Álvarez *et al.*, 2009; Denoia *et al.*, 2009; Campitelli *et al.*, 2010; Costa *et al.*, 2014).

Los cambios inducidos, dada la naturaleza heterogénea de la red de poros de cada suelo, generan incertidumbre respecto del balance hídrico, la retención y el movimiento del agua en el suelo, razón por la cual

la medida del comportamiento hidráulico del suelo sometido a SD continua resulta importante.

Con base en los antecedentes citados, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la SD continua sobre el comportamiento físico y funcional de los suelos franco limosos de la región central de la provincia de Córdoba (Argentina).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en la región semiárida central de la provincia de Córdoba, (Argentina), en un área delimitada por las siguientes coordenadas geográficas: 30° 17' 20" S; 64° 13' 34" - 30° 17' 15" S; 63° 34' 17" O, al norte, y 31° 20' 15" S; 64° 15' 30" O - 31° 17' 15" S; 63° 32' 20" O, en su extremo sur, a una altitud promedio de 342 m. El área se inserta en la región ecológica identificada como Espinal (Agencia Córdoba Ambiente, 2003). Actualmente presenta extensos campos llanos cultivados con escasos mosaicos de vegetación nativa.

La agricultura es la actividad principal y son comunes los cultivos estivales, principalmente soja (*Glixine max* L.) Merr.) y maíz (*Zea mays* L.).

El clima es templado con características continentales, con una temperatura media anual de 17 °C y una precipitación media anual de 760 mm, concentrada en verano (Jarsún *et al.*, 2003).

Predominan los suelos de textura franco-limosa, desarrollados sobre loess, con carbonatos de calcio, difuso en profundidad, se clasifican como: Haplustoles énticos y Haplustoles típicos según Soil Taxonomy (Soil Survey Staff, 2014). En los primeros, la secuencia de horizontes dominantes es: A-AC-C<sub>k</sub> y los Haplustoles típicos responden a una secuencia de horizontes A-Bw-BC-Ck (INTA, 2006). Las muestras de suelo se tomaron en lotes individuales de 6 establecimientos pertenecientes a los socios del Consorcio Regional de Experimentación Agrícola (CREA) en el marco del Proyecto de Sustentabilidad, convenio CREA-Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA), Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

Cada lote constituyó una unidad de muestreo homogénea (UM) con diez años de agricultura continua bajo siembra directa y un manejo rotacional en común (maíz-soja). Se trabajó con una unidad por localidad. Las localidades fueron Las Arrias, Cañada de Luque, Montecristo, Piquillín, Pilar y La Paz; para su ubicación y seguimiento posterior en el marco del convenio

CREA-FCA-UNC cada UM fue georreferenciada.

Las UM identificadas como 1, 2 y 3 se ubican en las localidades de Monte Cristo, Piquillín y Pilar, respectivamente. Originalmente correspondían a sistemas de producción mixtos, los que a partir del año 2000 progresivamente fueron reemplazados por sistemas agrícolas puros con un cambio en el sistema de labranza de tradicional a SD. Registran más de 50 años de actividad agrícola (>50 AAC) como indicador de su intensidad de uso. Las restantes unidades UM, 4,5, y 6 (La Paz, Cañada de Luque y Las Arrias) provienen también de sistemas mixtos, pero tienen un registro menor de actividad agrícola (>10 AAC) siempre bajo SD con cultivos estivales, principalmente soja (*Glixinemax* L.) Merr.) y maíz (*Zea mays* L.).

## Muestreo, Medidas y Cálculos

Para la caracterización del suelo de las unidades de muestreo, se tomaron muestras compuestas (25 submuestras) del horizonte A de 0 a 20 cm de profundidad y, para la medida del carbono orgánico (CO) se tomaron muestras compuestas (25 submuestras) de 0-5 cm y 5-15 cm de profundidad del mismo horizonte. Las muestras fueron secadas, molidas y tamizadas con malla de 2 mm.

El CO se midió por la técnica de Walkley y Black (Nelson y Sommer, 1982), nitrógeno total (NT) por el método de Kjeldahl; pH 1:2.5 por potenciometría, conductividad eléctrica en pasta saturada (CE); fósforo extractable (PE) por el método de Bray y Kurtz 1 (1945) y la distribución del tamaño de partículas (arcilla < 2 µm, limo 2-50 µm, y arenas > 50 µm) mediante el método de la pipeta (Soil Conservation Service, 1972). Todas las determinaciones se llevaron a cabo por triplicado.

Para la medida de la densidad aparente (Dap), en diez puntos al azar se tomaron bloques de suelo sin disturbar (Blake y Hartge, 1986) por medio de un cilindro de volumen conocido (7 cm diámetro × 7 cm altura) de 0 a 7 cm (Prof.1) y 7 a 14 cm (Prof.2).

Las muestras de suelo se secaron a 105 °C y se masaron para el cálculo de la relación masa/volumen luego de lo cual se molieron y tamizaron para la medida de la densidad real (Dr) por picnometría.

Se calculó el porcentaje de poros (P) a través de la Ecuación 1:

$$P(\%) = 100 \cdot [1 - (Dap/Dr)] \quad (1)$$

Simultáneamente, respetando puntos georreferenciados (WP) del muestreo de Dap, se extrajeron en cada una de las UM diez muestras no disturbadas con cilindros de 5 cm de diámetro y 15 cm de altura para la medida en laboratorio de la conductividad hidráulica a saturación ( $K_{sat}$ ), siguiendo el procedimiento descrito por Soracco *et al.* (2008). Se condujeron ensayos de percolación con  $CaCl_2$  0.01 M durante el tiempo necesario para alcanzar flujo de agua en estado estacionario.

El valor de  $K_{sat}$  se obtuvo de acuerdo a la Ecuación 2:

$$q(mm/h) = K_{sat} \cdot [(h+z)/z] \quad (2)$$

donde: q = volumen percolado por unidad de tiempo y área (flujo), h = carga hidráulica aplicada, y z = espesor de la columna de suelo.

### Análisis Estadístico

Los datos fueron sometidos al análisis de varianza (ANOVA) y las medias fueron comparadas mediante la prueba LSD-Fisher ( $P < 0.01$ ). Todos los cálculos estadísticos se llevaron a cabo utilizando el programa INFOSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2013).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores medios obtenidos para cada propiedad de suelo medida en la caracterización de las unidades de muestreo se observan en el Cuadro 1. El contenido promedio de CO del horizonte superficial de 0 a 20 cm de profundidad fue de  $19.6 \text{ g kg}^{-1}$ , con un valor medio de NT de 0.856%, los valores de pH estuvieron comprendidos en un rango entre 5.8 a 6.5 y, en todos los casos, la CE estuvo por debajo de  $1 \text{ dS m}^{-1}$ .

Las mayores variaciones analíticas se presentaron en los contenidos de P-Bray que fueron desde un mínimo de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  a un máximo de  $134 \text{ mg kg}^{-1}$ . La marcada amplitud en el rango medido responde al manejo nutricional que cada productor realiza del lote (UM) en relación al uso de fertilizantes fosforados.

### Efecto del Contenido de Limo sobre el Comportamiento Físico

Porcentualmente la fracción dominante fue la de limo entre 53 y 56%, con 18 al 28% de arcilla y una variación porcentual de arena (fina y muy fina) entre 19 y 27% (Cuadro 2).

El alto contenido de partículas minerales de limo no favorecen una agregación estable, y tal como lo señalan Chan and Heenan (1996), Cosentino *et al.* (2002) y Ferreras *et al.* (2007) es un factor que contribuye a la inestabilidad de los agregados. Por otra parte, el reducido porcentaje de arcilla y la baja proporción de CO ( $< 20 \text{ g kg}^{-1}$ ) no contribuyen a una elevada cohesión de los agregados.

Guérif *et al.* (2001) señalan que estos suelos, franco limosos, se caracterizan por una deficiente formación de grietas, bioporos o macro estructura como resultado del manejo, es decir manifiestan una reducida proporción de macroporos de diferente origen, por lo que tienen características de pobre calidad física. Así lo demuestran Ferreras *et al.* (2007) y Campitelli *et al.* (2010) al evaluar indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa, en lotes cuya historia agrícola asciende a más de 20 años, se observa que presentan una baja estabilidad estructural, acompañada de una elevada resistencia mecánica.

Trabajos realizados por Richard *et al.* (2001) y Dexter (2004a) sobre suelos de texturas franca y

**Cuadro 1. Valores promedios de carbono orgánico (CO), nitrógeno total (NT), pH, conductividad eléctrica (CE) y fósforo extractable (P-Bray) medido en el horizonte superficial en muestras de 0 a 20 cm de profundidad de cada una de las unidades de muestreo (UM) bajo estudio. Letras distintas indican diferencias significativas, Test de LSD-Fisher ( $P < 0.01$ ).**

	UM1	UM2	UM3	UM4	UM5	UM6
CO ( $\text{g kg}^{-1}$ )	13.07a	14.2a	29.8c	17.7b	16.6b	24.8c
NT (%)	0.102a	0.200c	0.112a	0.146b	0.156b	0.140b
pH	5.97a	5.80a	6.32a	6.11a	6.41a	6.55a
CE ( $\text{dS m}^{-1}$ )	0.3a	0.3a	1.7b	0.4a	0.5a	0.4a
P-Bray ( $\text{mg kg}^{-1}$ )	34.3b	69.0b	134.0c	15.0a	116.0c	106.0c

**Cuadro 2. Distribución del tamaño de partículas y clase textural de cada unidad de muestreo (UM), porcentaje de arcilla < 2 mm, limo 2-50 mm, y arenas > 50 mm, de 0 a 20 cm de profundidad. Letras distintas indican diferencias significativas, Test de LSD-Fisher ( $P < 0.01$ ).**

Unidad de Muestreo	UM1	UM2	UM3	UM4	UM5	UM6
Composición granulométrica						
Arcilla (%)	25.8b	24.6b	20.4b	18.6a	23.9b	24.6b
Limo (%)	55.2a	53.6a	54.6a	54.4a	56.2a	56.2a
Arena (%)	19.0a	21.8a	25b	27b	19.9a	19.2a
Clase textural	Franco limoso	Franco limoso	Franco limoso	Franco limoso	Franco limoso	Franco limoso

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. La tendencia de los suelos franco-limosos a presentar este comportamiento puede deberse al efecto de la fracción limo sobre los cambios en el medio físico inducidos por la SD continua.

En los últimos años numerosos trabajos, alertan sobre la presencia de estructura laminar (con agregados alargados orientados paralelamente a la superficie del suelo) dentro de los primeros centímetros del horizonte superficial en los suelos con más de 50% de limo en condiciones de SD continua, Sasal *et al.* (2006), Álvarez *et al.* (2009), Soracco *et al.* (2010), Álvarez (2013), Rollán y Bachmeier (2013), Costa *et al.* (2014) entre otros. En el presente estudio de campo se observó en la UM1 este tipo de estructura laminar (EL) en los primeros centímetros de profundidad asociada a un valor promedio de Dap  $1.38 \text{ Mg m}^{-3}$  (Cuadro 3). Esta presencia estructural puede explicarse teniendo en cuenta la baja cohesión que producen las partículas de limo y arena, que en esta UM constituyen más del 70% de los sólidos minerales presentes, de modo que resultan agregados de alta separabilidad (Chan and Heenan, 1996; Cosentino y Pecorari, 2002; Dexter, 2004a; Denoia *et al.*, 2009). Estas características granulométricas, en sistemas deteriorados como éste (>50AAC) promueven el desarrollo de condiciones estructurales desfavorables (Ferrerías *et al.*, 2007). Sin embargo, este tipo de EL no se observó en los restantes lotes por lo que, a diferencia de lo citado por Álvarez (2013) y Lar *et al.* (2013) en los suelos franco limosos estudiados el tipo de EL no se observa en forma generalizada como consecuencia de la SD continua. Aun así es importante destacar que muchos procesos vinculados a la degradación de los suelos, tienen su origen y a la vez se manifiestan principalmente en

los primeros centímetros del perfil, en un espesor menor al evaluado. Drees *et al.* (1994) al determinar los efectos de la SD en las características estructurales de un suelo franco limoso observaron EL fuerte de 1 a 3 cm de profundidad, lo que hace necesario centrar el análisis del deterioro de las propiedades edáficas en esta porción del horizonte superficial.

### Estado Físico – Estructural: Densidad Aparente, Porosidad y Compactación

Los valores promedios de densidad aparente (Dap), densidad real (Dr), porcentaje de poros (P) y conductividad hidráulica a saturación ( $K_{\text{sat}}$ ) de 0 a 7 cm (Prof.1) y 7 a 14 cm (Prof.2) se encuentran en el Cuadro 3.

En todas la UM existieron diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) entre los valores de Dap medidos en las Prof.1 y Prof.2. Los mayores valores de Dap se registraron de 7 a 14 cm de profundidad donde el aumento de la Dap fue de 9 a 15 % en los lotes con 10 AAC y de 6 a 20% en los lotes de 50 AAC (Cuadro 3). Este comportamiento difiere de lo observado por Parra *et al.* (2011) quienes al evaluar el efecto de los sistemas de labranza no registran diferencias significativas entre los valores de Dap superficial (0-10) y sub superficial (10-20) en los lotes bajo SD.

Los menores valores de Dap superficial (Prof.1) correspondieron a las UM con menor intensidad de uso agrícola (10 AAC) (Cuadro 3), lo que coincide con lo observado por Dardanelli *et al.* (1997) y Ferrerías *et al.* (2000), quienes después de 10 años del empleo de siembra directa, encontraron menores valores de densidad aparente en el suelo bajo SD en los primeros centímetros de profundidad en comparación con el sistema de labranza convencional.

Se observó un comportamiento diferencial entre las UM de >50 AAC y las UM con menor intensidad

**Cuadro 3. Valores promedios de densidad aparente (Dap), densidad real (Dr), porosidad total (P), conductividad hidráulica a saturación (Ksat) y carbono orgánico (CO) de las distintas unidades de muestreo: UM 1-3, con mayor intensidad de uso agrícola (> 50 AAC) y UM 4-6, con menor intensidad de uso agrícola. Prof. 1 (0 a 7 cm) y Prof. 2 (7 a 14 cm) hacen referencias a las profundidades estudiadas. Letras distintas indican diferencias significativas, Test de LSD-Fisher ( $P < 0.01$ ).**

Profundidad	UM1		UM2		UM3		UM4		UM5		UM6	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Dap (Mg m <sup>-3</sup> )	1.38b	1.42b	1.28a	1.55b	1.23a	1.31b	1.14a	1.31b	1.15a	1.32b	1.18a	1.29b
Dr (Mg m <sup>-3</sup> )	2.48a	2.48a	2.47a	2.45a	2.49a	2.51a	2.46a	2.52a	2.46a	2.44a	2.50a	2.50a
P (% v/v)	44.35b	42.63b	52.17c	36.43a	50.47b	47.83b	50.80a	48.01a	53.73b	48.17a	52.4a	49.8a
Ksat (mm h <sup>-1</sup> )	17.27b	10.43a	21.73c	14.97b	20.87c	15.93b	31.35b	10.10a	30.3b	17.8a	24.0b	19.8a
CO (g kg <sup>-1</sup> )	20.4b	10.8a	20.5b	11.6a	21.3b	11.1a	26.2b	15.3a	26.3b	14.5a	22.4b	18.5a

de uso, con diferencias significativas en relación a los valores de Dap (Cuadro 3). Soracco *et al.* (2008) indican que la textura es un factor determinante de este comportamiento diferencial; sin embargo, al ser los suelos evaluados de la misma clase textural, este comportamiento diferencial es atribuible al deterioro causado por los años de agricultura continua que registra cada unidad. Así, las UM con más de 50 años de AAC registran valores de Dap próximos o superiores a los valores de Dap crítica entre 1.36 y 1.40 Mg m<sup>-3</sup> citados por Rollán y Bachmeier (2014) como valores límites para los Molisoles franco-limosos de la región.

Manso *et al.* (2012) explican este aumento como resultado de la agricultura continua indicando que la intensidad de uso del suelo, independientemente del sistema de labranza, es la causa de la compactación observada por debajo de los 10 cm de profundidad en los molisoles de la región pampeana Argentina. Álvarez *et al.* (2009), Manso *et al.* (2012) y Dal Ferro *et al.* (2014) señalan que esta compactación es un comportamiento generalizado de los suelos limosos y franco-limosos sometidos a SD continua. Distinto es lo que sucede en los suelos franco arcillosos, los que pueden ver compensados el bajo porcentaje de porosidad estructural que genera la condición de SD con los macroporos resultantes de los procesos de fisuración debidos a la alternancia de ciclos de *humectación – desecación* (Cerisola *et al.*, 2005).

A nivel superficial el mayor valor de Dap fue de 1.38 Mg m<sup>-3</sup> en la UM1 (>50 AAC). Valores similares fueron reportados por Parra *et al.* (2011) en lotes provenientes de sistemas agrícolas mixtos bajo SD. Los autores concluyen que el aumento de la Dap en los lotes con estos sistemas de producción (mixtos) se debe a que adicionan al estrés del tránsito de

las máquinas el efecto compactador del pisoteo del ganado. Para las condiciones bajo estudio la situación fue inversa: el efecto del pisoteo del ganado ocurrió en años anteriores (originalmente las UM tenían un sistema de producción mixto) de modo que en este lote (UM1) el deterioro generado por el manejo mixto se sumó a los cambios inducidos por la SD.

Las características mineralógicas de este suelo, rico en limo (Cuadro 2), impiden la regeneración de estructuras degradadas (Sasal y Andriulo, 2005; Sasal *et al.*, 2006; Taboada *et al.*, 2008). Las arcillas del grupo de las illitas predominante en los suelos de la región (Cosentino y Pecorari, 2002) le confieren muy baja capacidad de auto-mullido (Sasal *et al.*, 2006). Todos estos factores promueven a la densificación potenciada por el estrés que genera el tránsito de máquinas.

En síntesis, el alto contenido de limo, la baja concentración de arcilla y la presencia de minerales de illita como tipo dominante de arcilla, conducen a que ni los medios abióticos (expansión-contracción) ni los biológicos (lombrices, raíces) sean efectivos para revertir los procesos de degradación física, tal como lo plantean Domínguez *et al.* (2009).

En todas las UM se observó una marcada estratificación del CO, los contenidos de la Prof. 1 difirieron significativamente ( $P < 0.01$ ) de los medidos en la Prof. 2 (Cuadro 3). En la mayoría de los casos el CO superficial (0 a 5 cm) duplicó los valores medidos de 5 a 15 cm de profundidad. Rollán y Bachmeier (2013) plantean que la estratificación de la materia orgánica no compensa la densificación generada por la SD, Álvarez (2013) concluye que el rol estabilizador del carbono orgánico está relacionado con el contenido de limo, de modo que a medida que la fracción limo aumenta, se requieren mayores contenidos de carbono orgánico para

mantener la estabilidad estructural. Otro es el planteo de Romero *et al.* (2014), quienes señalan al ambiente y la intensidad de uso como factores condicionantes del efecto que el contenido de CO puede ejercer en condiciones de SD. Los autores concluyen que en los suelos de ambientes semiáridos sometidos a un largo historial agrícola, el sistema de labranza convencional ha afectado de manera significativa la resiliencia del proceso de humificación, de modo que la adopción de prácticas de recuperación como la no remoción del suelo o la SD no logra revertir el curso del proceso de degradación. Esto coincide con Campitelli *et al.* (2010) quienes concluyen que bajo condiciones de semiaridez la siembra directa no logra mejorar significativamente las características físicas.

De modo que, para las condiciones bajo estudio, aún con un aumento significativo en el contenido de CO, la SD continua no generó condiciones físicas favorables (menor Dap y mayor % P) en las UM. El grado de deterioro previo y la naturaleza mineralógica (dominancia de la fracción limo y arcillas illíticas) actúan como condicionantes del proceso.

La porosidad total (P) del suelo varió entre 36 y 54%, asociada a los valores de Dap máximos y mínimos, respectivamente. Los valores de P de 0 a 7 cm de profundidad estuvieron comprendidos en el rango informado por Soracco *et al.* (2008) y Sasal *et al.* (2006) entre el 52 y 54%. No hubo diferencias significativas en los valores P entre UM pero sí entre las profundidades 1 y 2 ( $P < 0.01$ ) dentro de un mismo lote.

Los menores valores de P a nivel sub-superficial (Prof.2) coinciden con los medidos por Sasal *et al.*, (2006), en lotes bajo SD continua, con valores de Dap similares a los de este ensayo.

La mayor compactación del suelo en SD se ha observado en otros experimentos a largo plazo (Sasal y Andriulo, 2005; Liepiec *et al.*, 2006; Hubert *et al.*, 2007; Álvares, 2013; Lars *et al.*, 2013). Este hecho se asocia comúnmente a la consolidación gradual de la matriz del suelo con el tiempo, debido a las precipitaciones y la ausencia de aflojamiento anual inducido por la labranza. Los efectos de la compactación del suelo sobre el movimiento y redistribución del agua en el perfil son estudiados principalmente a través de los cambios en sus propiedades hidráulicas.

Vieira Cavalieri *et al.* (2009) determinan la evolución negativa de parámetros físico-mecánicos de los suelos bajo SD, tales como: aumento de la densidad

aparente y de la compactación. No obstante, en trabajos de largo plazo, estos autores no encuentran el potencial de efecto negativo esperable sobre propiedades fundamentales tales como: la permeabilidad intrínseca al aire ( $K_a$ ) y la conductividad hidráulica saturada ( $K_{sat}$ ). Concluyen, entonces, que el sistema de SD es sustentable en el tiempo, porque el suelo continuó siendo dinámicamente funcional respecto al sistema poroso y su continuidad espacial.

Un comportamiento similar al planteado se observó en este estudio donde los mayores valores de densidad aparente no coinciden con los menores valores de  $K_{sat}$ , probablemente como resultado de un aumento de la conducción del agua por mesoporos, a pesar de una disminución en el diámetro de dichos mesoporos, estimado por efecto de la compactación, como lo plantean Moret y Arru'e (2007).

### **Comportamiento Funcional: Conductividad Hidráulica**

Las propiedades hidráulicas de suelos con la misma textura dependen de la densidad aparente y la estructura. El incremento en la densidad aparente no sólo induce cambios en la distribución de la porosidad sino que también afecta la capacidad de contracción del suelo y de conducir agua (Dec *et al.*, 2008). La estructura actúa como factor determinante de las características del sistema poroso. La anisotropía de los poros bajo SD está relacionada a la presencia de EL, lo que fue corroborado experimentalmente por Soracco *et al.* (2010), quienes encontraron valores de  $K_{sat}$  vertical cinco veces menor que los valores de  $K_{sat}$  horizontal en un suelo de textura franco-limosa con presencia de fuerte EL a nivel superficial.

Para las condiciones de este estudio, con excepción de la UM1, las restantes UM no presentaron estructura laminar por lo que la ausencia de EL en la mayoría de las UM y la homogeneidad en la composición granulométrica de las muestras de suelo, reducen la anisotropía del sistema poroso.

En los suelos franco-limosos estudiados la  $K_{sat}$  promedio fue de 24.2 mm h<sup>-1</sup> en la Prof. 1 y 14.8 mm h<sup>-1</sup> en la Prof. 2 con promedios de Dap de 1.2 y 1.4 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Filgueira *et al.* (2006), para un suelo franco arcilloso con distinta historia de uso, informan valores de  $K_{sat}$  de 65.8±12.6 y 33.3±10.2 mm h<sup>-1</sup> y Dap entre 0.77 y 1.43 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente. Los autores señalan que la compactación no afecta la porosidad

textural (es decir, porosidad de la matriz), pero crea poros estructurales como relictos accesibles sólo a través de los microporos de la matriz. Estos poros estructurales relictos podrían ser la razón del cambio en las propiedades hidráulicas al compactarse el suelo.

Trabajos realizados por Richard *et al.* (2001) y Dexter (2004b) 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. La disminución de los flujos estacionarios en los sitios compactados, sugieren que los poros que participaban en la conducción del agua eran más pequeños, y que, probablemente, hubo menor conectividad en el sistema poroso, lo que muestra el grado en que los procesos de compactación afectan el movimiento del agua en el suelo.

Se observaron diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) en los valores de  $K_{sat}$  entre UM según su historial agrícola. En los lotes con menor intensidad de uso agrícola (10 AAC) UM 4, 5 y 6 los mayores valores de  $K_{sat}$  en Prof.1 (Cuadro 3) se corresponden con bajos valores de Dap (entre 1.1 y 1.2 Mg cm<sup>-3</sup>) lo que podría indicar la dominancia en estos ambientes de los macroporos durante el flujo saturado (Dec *et al.*, 2008). En contraste, las UM con >50AAC presentaron en la Prof. 1 altos valores de  $K_{sat}$  asociados a valores de Dap mayores a los registrados en las UM de menor intensidad de uso. En las UM (>50 AAC) los mayores valores de Dap se deberían a la pérdida de porosidad estructural. Sin embargo, la estratificación del contenido de CO habría contribuido a la continuidad del espacio poroso, tal como lo plantean Fuentes *et al.* (2004), quienes al estudiar las propiedades hidráulicas de un suelo franco limoso sometido a distintas condiciones de manejo observaron que el principal factor responsable de la variación de la  $K_{sat}$  fue la expansión de los poros del suelo causada por condiciones de mayor capacidad de retención debido al mayor contenido de materia orgánica. Otro es el análisis que realizan Hubert *et al.* (2007), quienes explican este comportamiento señalando que, por falta de remoción, el suelo sólo se somete a la fragmentación biológica, por lo que no se observa ninguna evolución cuantitativa ni morfológica de la macroporosidad de modo que mantiene la condición de mayor Dap, pero después de un largo período en SD, la configuración del

sistema poroso del suelo y la conductividad hidráulica a saturación pueden alcanzar un estado de equilibrio favorable. En contraste es posible inferir que dado el comportamiento dinámico del suelo la configuración de los poros del suelo y sus propiedades hidráulicas no se estabilizan aún luego de un largo periodo bajo SD, lo que indicaría que el concepto de estabilización de propiedades físicas en SD sería relativo.

## CONCLUSIONES

- Los cambios inducidos por la siembra directa continua sobre la densidad aparente, la porosidad y la conductividad hidráulica regulan el comportamiento físico-funcional de los suelos franco-limosos de la región agrícola central de Córdoba, Argentina. Desde el punto de vista físico el incremento de la densidad aparente es una consecuencia directa del uso a largo plazo de este sistema de labranza y, según el grado de deterioro previo, la compactación inducida se manifestará a nivel superficial y subsuperficial, lo que puede derivar en el desarrollo de estructuras desfavorables.
- Desde el punto de vista funcional, la compactación conduce a cambios en las propiedades hidráulicas del horizonte superficial.

## LITERATURA CITADA

- Agencia Córdoba Ambiente. 2003. Regiones naturales de la provincia de Córdoba. Agencia Córdoba Ambiente-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Manfredi, Córdoba, Argentina.
- Álvarez, C. 2013. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: caracterización, génesis y manejo. *Informaciones Agronómicas*. 10: 2-9.
- Álvarez, C. R., M. A. Taboada, F. H. Gutiérrez-Boem, A. Bono, P. L. Fernández, and P. Prystupa. 2009. Topsoil properties as affected by tillage systems in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 73: 1242-1250.
- Blake, G. R. and K. H. Hartge. 1986. Bulk density. pp. 363-375. *In*: A. Klute (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical methods*. SSSA Book Series 5.1. Am. Soc. Agron. Madison, WI, USA.
- Bongiovanni, M. D. and J. C. Lobartini. 2006. Particulate organic matter, carbohydrate, humic acid contents in soil macro and microaggregates as affected by cultivation. *Geoderma* 136: 660-665.
- Bono, A., R. Álvarez, D. E. Buschiazzo, and R. J. C. Cantet. 2008. Tillage effects on soil carbon balance in a semiarid agroecosystems. *Soil Sci Soc Am J.* 72: 1140-1149.
- Bray, R. H. and L. T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. *Soil Sci.* 59: 39-46.

- Campitelli, P., A. Aoki, O. Gudelj, A. Rubenacker, y R. Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Cienc. Suelo* 28: 223-231.
- Cerisola, C. I., M. G. García, y R. R. Filgueira. 2005. Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *Cienc. Suelo* 23: 35-40.
- Chan, K. Y. and D. P. Heenan. 1996. Lime-induced loss of soil organic carbon and effect on aggregate stability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 1841-1844.
- Cholaky, C., J. M. Cisneros, and R. Balbuena. 2010. Field performance of a winged scarifier as a function of soil compaction and water content. *Chilean J. Agric. Res.* 70: 150-158.
- Cosentino, D. J. y C. Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Cienc. Suelo* 20: 9-16.
- Costa, J. L., V. Aparicio, and A. Cerda. 2014. Soil physical quality changes under different management systems after 10 years in Argentinian humid pampa. *Solid Earth Discuss* 6: 2615-2644.
- Dal Ferro, N., C. Pagliarin, and F. Morari. 2014. Pore network and water retention characteristics of volcanic porous media. *Eur. J. Soil Sci.* 65: 672-683.
- Dardanelli, J., O. Bachmeier, R. Sereno, and R. Gil. 1997. Potential soil water extraction parameters for several crops in a silty loam soil. *Field Crops Res.* 54: 29-38.
- Dec, D., J. Dorner, O. Becker-Fazekas y R. Horn. 2008. Efecto de la densidad aparente sobre las propiedades hidráulicas de los suelos homogenizados y estructurados. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 8: 1-13.
- Denoia, J., D. Giorgi y S. Fernández. 2009. Degradación superficial en suelos con diferente historia de uso agrícola. *Rev. FAVE - Cienc. Agrar.* 8: 47-59.
- Derpsch, R. 2011. Situación general de la siembra directa en el mundo. <http://www.rolf-derpsch.com/>. (Consulta: marzo 8, 2014).
- Dexter, A. R. 2004a. Soil physical quality: Part I: Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma* 120: 201-214.
- Dexter, A. R. 2004b. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma* 120: 227-239.
- Di Rienzo, J. A., F. Casanoves, M. G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C. W. Robledo. 2013. InfoStat versión 2013. URL <http://www.infostat.com.ar>. (Consulta: diciembre 4, 2014).
- Domínguez, A., J. C. Bedano y A. R. Becker. 2009. Cambios en la comunidad de lombrices de tierra (Annelida:lumbricina) como consecuencia del uso de la técnica de siembra directa en el centro-sur de Córdoba, Argentina. *Cienc. Suelo* 27: 11-19.
- Drees, L. R., A. D. Karathanasis, L. P. Wilding, and R. L. Blevins. 1994. Micromorphological characteristics of long-term no-till and conventionally tilled soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 508-517.
- Duval, M. E., J. A. Galantini, J. O. Iglesias, S. Canelo, J. M. Martínez, and L. Wall. 2013. Analysis of organic fractions as indicators of soil quality under natural and cultivated systems. *Soil Tillage Res.* 131: 11-19.
- Ferreras, L. A., J. L. Costa, F. O. Garcia, and 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 Tillage Res.* 54: 31-39.
- Ferreras, L., G. Magra, P. Besson, E. Kovalevski y F. García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Cienc. Suelo* 25: 159-172.
- Filgueira, R. R., C. G. Soracco, G. O. Sarli y L. L. Fournier. 2006. Estimación de propiedades hidráulicas de suelos por mediciones a campo y el uso de modelos de flujo estacionario y transitorio. *Cienc. Suelo* 24: 1-10.
- Fuentes, J. P., M. Flury, and D. F. Bezdicek. 2004. Hydraulic properties in a silt loam soil under natural prairie, conventional till, and no-till. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 1679-1688.
- Guérif, J., G. Richard, C. Dürr, J. M. Machet, S. Recous, and J. Roger-Estrade. 2001. A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Tillage Res.* 61: 13-32.
- Guzmán, G., J. V. Giráldez, and J. A. Gómez. 2014. Short term effect of conventional tillage and cover crops in physical and chemical properties in two olive orchards of southern Spain. *Geophys. Res. Abstr.* 16: 799-783.
- Hubert, F., V. Hallaire, P. Sardini, L. Caner, and D. Heddadj. 2007. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma* 142: 226-236.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria). 2006. Recursos naturales de la provincia de Córdoba. Los suelos, nivel de reconocimiento 1:500.000. Agencia Córdoba Ambiente-Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Estación Experimental Manfredi. Córdoba, Argentina.
- Jarsún, B., J. A. Gorgas, E. Zamora, E. Bosnero, E. Lovera, A. Ravelo y J. L. Tassile. 2003. Caracterización general de la provincia. pp. 23-60. *In: J. A. Gorjas and J. L. Tassile. Recursos naturales de la Provincia de Córdoba. Los Suelos. Córdoba, Argentina Agencia Córdoba Ambiente e INTA. Córdoba, Argentina.*
- Lal, R. 2014. Soil conservation and ecosystem services. *Int. Soil Water Conserv. Res.* 2: 36-47.
- Lars, J., R. Munkholm, J. Heck, and B. Dee. 2013. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil Tillage Res.* 127: 85-91.
- Lipiec, J. Kus', A. Słowińska-Jurkiewicz, and A. Nosalewicz. 2006. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. *Soil Tillage Res.* 89: 210-220.
- Manso, M. L., G. A. Studdert, H. J. Forján y S. San Martino. 2012. Efecto de sistemas de labranza contrastantes sobre algunas propiedades de un molisol de Tres Arroyos bajo distintos usos previos. *Rev. FCA UNCUYO* 44: 85-99.
- Moret, D. and J. L. Arru'e. 2007. Dynamics of soil hydraulic properties during fallow as affected by tillage. *Soil Tillage Res.* 96: 103-113.
- Mualem, Y. 1984. Anisotropy of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 48: 505-509.
- Nelson, D. W. and L. E. Sommers 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. pp. 539-580. *In: A. L. Page, R. H. Miller, D. R. Keeney (eds.). Methods of soils analysis II: Chemical and microbiological properties. SSSA Book Series No. 9, SSSA and ASA. Madison, WI, USA.*

- Oosterheld, M. 2008. Impacto de la agricultura sobre los ecosistemas. Fundamentos ecológicos y problemas más relevantes. *Ecol. Austral* 18: 337-346.
- Parra, B. J., A. R. Becker y M. P. Cantu. 2011. Condición física de suelos en diferentes sistemas de manejo agrícolas del centro sur de Córdoba. *Cienc. Suelo* 29: 241-251.
- Richard, G., I. Cousin, J. F. Sillon, A. Bruand, and 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.
- Rollán, A. A. del C. y O. A. Bachmeier. 2014. Compactación y retención hídrica en Haplustoles de la provincia de Córdoba (Argentina) bajo siembra directa. *Agriscientia* 31: 1-10.
- Rollán, A. A. del C. y O. A. Bachmeier. 2013. Siembra directa evaluación de la densidad aparente como indicador de la necesidad de labores de descompactación. *Rev. Nexo Agropec.* 1: 7-10.
- Romero, C. M., L. Noe, A. Abril, and E. A. Rampoldi. 2014. Resilience of humification process to evaluate soil recovery in a semiarid agroecosystem of Central Argentina. *Spanish J. Soil Sci.* 4: 2011-2024.
- Sanzano, G., R. Corbella, J. García, and G. Fadda. 2005. Degradación física y química de un Haplustol Típico bajo distintos sistemas de manejos del suelo. *Cienc. Suelo* 23: 93-100.
- Sasal, M. C. y A. E. Andriulo. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L. (nabo forrajero). *RIA*, 34: 131-150.
- Sasal, M. C., A. E. Andriulo, and M. A. Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil Tillage Res.* 87: 9-18.
- Soil Conservation Service. 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soils samples. *Soil Surv. Report, 1*. USDA. Washington, DC, USA.
- Soil Survey Staff. 2014. Keys to soil taxonomy. USDA-Natural Resources Conservation Service. Washington, DC, USA.
- Soracco, C. G., L. A. Lozano, P. R. Gelati, G. O. Sarli, y R. Filgueira. 2008. Anisotropía en la porosidad de un suelo franco limoso bajo siembra directa continua. *Rev. Fac. Agron. La Plata* 107: 1-6.
- Soracco, G., L. A. Lozano, G. O. Sarli, P. R. Gelati, and R. R. Filgueira. 2010. Anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a soil under conservation and no-till treatments. *Soil Tillage Res.* 109: 18-22.
- Strudley, M. W., T. R. Green, and J. C. Ascough. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil Tillage Res.* 99: 4-48.
- Taboada, M. A., O. A. Barbosa, and D. J. Cosentino. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
- Taboada, M. A., O. A. Barbosa, M. B. Rodríguez, and D. J. Cosentino. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty-loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- Vieira Cavalieri, K. M., A. Pires da Silva, C. A. Tormena, T. Paiva Leão, A. Dexter, and I. Håkansson. 2009. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Parana, Brazil. *Soil Tillage Res.* 103: 158-164.