

## **Compactación en sistemas agrícolas y mixtos en la Pampa Ondulada argentina**

### **Soil compaction in continuous agriculture and integrated agriculture-livestock systems in the Rolling Pampa of Argentina**

<sup>\*</sup>  
Carina R. Alvarez<sup>1</sup>  
*alvarezc@agro.uba.ar (ex-aequo)*

Patricia L. Fernandez<sup>1-2</sup>

Miguel A. Taboada<sup>2-3</sup>

Diego J. Cosentino<sup>4-2</sup>

*\* Autores de contacto*

---

<sup>1</sup> Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

<sup>2</sup> CONICET

<sup>3</sup> INTA, Instituto de Suelos, Castelar

<sup>4</sup> Cátedra de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires

## ÍNDICE CAPÍTULO 14

■ RESUMEN .....	452
■ ABSTRACT .....	453
■ INTRODUCCIÓN .....	454
■ CARACTERIZACIÓN DE LA PAMPA ONDULADA .....	454
■ CALIDAD FÍSICA EDÁFICA EN LA PAMPA ONDULADA.....	457
■ RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN .....	457
■ AMBIENTE FAVORABLE PARA DESARROLLO RADICAL Y LA BIOTA DEL SUELO.....	460
Densidad aparente .....	460
Resistencia a la penetración .....	462
Estructuras desfavorables .....	464
■ REMOCIÓN MECÁNICA DE ESTRATOS COMPACTADOS .....	468
■ REGENERACIÓN BIOLÓGICA .....	470
■ EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS EN EL TIEMPO .....	470
■ PREVENCIÓN .....	473
■ BIBLIOGRAFÍA .....	474

## ■ RESUMEN

La región pampeana norte (Pampa Ondulada) presenta procesos de degradación como la erosión y la compactación. Esta última es consecuencia de características intrínsecas del suelo y del manejo. En particular, es importante señalar la alta proporción de limos lo cual les confiere fragilidad a los suelos y una larga historia agrícola. En relación a los sistemas predominantes en la región en la actualidad, se pueden señalar los agrícolas y los agrícolas-ganaderos, ambos bajo siembra directa. El sistema de siembra directa conllevó al uso de maquinaria cada vez más pesada. La compactación de los suelos se evidenció mediante las mediciones a campo de la resistencia a la penetración y la densidad aparente, aunque los resultados no fueron concluyentes evidenciando principalmente un endurecimiento. La tasa de infiltración puso de manifiesto los problemas en el estrato superficial, lo cual fue avalado por la lectura de los cortes delgados en los cuales se observa una estructura laminar con un sistema poroso con alta tortuosidad y debajo de esta una masa basal densa con muy baja porosidad. El pisoteo del ganado ha mostrado un muy leve incremento en la resistencia a la penetración en los primeros 7,5 cm respecto de los sistemas agrícolas. La descompactación surge como una alternativa a estos problemas en el estrato superficial. Este abordaje de la problemática resultó en una medida del corto plazo. Por otro lado, las raíces de cultivos han sido una manera de mejorar las condiciones hidrofísicas del suelo, que pueden ser vulneradas en el momento de la cosecha. Sin embargo, la incorporación de pasturas, en sistemas agrícolas ganaderos, no sólo abre camino a la diversificación, sino que puede ser la estrategia para la mejora de la calidad del suelo sostenida en el tiempo.

### Palabras clave

resistencia a la penetración,  
infiltración, descompactación,  
densidad aparente, estructura del suelo,  
regeneración biológica.

## ■ ABSTRACT

The northern Pampas region (Rolling Pampa) presents soil degradation processes such as erosion and compaction. The latter is a consequence of intrinsic soil characteristics and management. In particular, it is important to remark the high proportion of silt which confers fragility to the soils and a long agricultural history. In relation to the predominant systems in the region at present, we can point out the agricultural and the agricultural-livestock ones, both under no tillage. The no tillage system led to the use of increasingly heavy machines. The compaction of soils was evidenced by field measurements of penetration resistance and bulk density, although the results were not conclusive, mainly showing soil hardening. The infiltration rate revealed the problems in the surface layer, which was supported by the observation of the thin sections in which a laminar structure was observed with a porous system with high tortuosity and below this a dense soil mass with very low porosity. Trampling of cattle has shown a very slight increase in penetration resistance in the first 7.5 cm compared to agricultural systems. Decompaction emerges as an alternative to these problems in the surface layer. This approach to the problem resulted in a solution in the short term. On the other hand, the roots of crops have been a way to improve the hydrophysical conditions of the soil, which can be damaged at the time of harvest. However, the incorporation of pastures, in livestock farming systems, not only opens the way to diversification, but can be the strategy for improving soil quality sustained over time.

**Keywords** | soil penetration resistance,  
infiltration rate, soil alleviation  
bulk density, soil structure,  
biotic regeneration.

## ■ INTRODUCCIÓN

La compactación de origen antrópico se origina por el uso y manejo de los suelos por el hombre con fines productivos (agricultura, ganadería, forestación) o recreativos (campos deportivos). Se define como compactación a la densificación y/o endurecimiento de capas en el perfil del suelo. La compactación de suelos con uso agrícola y/o ganadero es uno de los causales por el cual los suelos se degradan, y está asociada con prácticas de manejo inadecuadas, como por ejemplo, el laboreo continuo, el descenso de los niveles de materia orgánica del suelo, el pasaje de maquinarias o el pastoreo con el suelo muy húmedo, el monocultivo, la falta de cobertura, entre otros. La compactación se manifiesta a través de incremento de la densidad aparente, y/o la resistencia del suelo, las formas estructurales desfavorables y la disminución de la infiltración, todo ello resulta en un ambiente desfavorable para el desarrollo de las raíces, una menor capacidad del suelo para amortiguar déficit hídricos, menor acceso a los nutrientes, entre otras problemáticas. La menor provisión de agua y nutrientes resulta en la disminución de la producción, mayores necesidades de fertilizantes y mayores costos de producción (Hamza & Anderson, 2005).

## ■ CARACTERIZACIÓN DE LA PAMPA ONDULADA

La Pampa Ondulada es una subregión de la pradera pampeana que puede ser subdividida en base a sus principales características ecológicas (Pereyra, 2003). Forma una franja de 100 km de ancho bordeada por el Río Paraná y el Río de la Plata al Noreste y por el Río Salado al Sureste. Esta planicie de casi 4,6 Mha posee un clima templado y húmedo con una precipitación media anual de 940 mm con cierta concentración primavera-verano y con una temperatura media anual de 17° (Soriano *et al.*, 1991). En función de su geomorfología y tipos de suelos puede subdividirse en Pampa Ondulada Alta y Baja (Cappannini & Dominguez, 1961). La primera se extiende hacia el norte del río La Matanza y ocupa dos tercios de la subregión. Tiene una morfología de paisaje bien ondulado con pendientes comunes del 2% y excepcionalmente del 4-5 %, que se asocian con una red hidrográfica dendrítica bien desarrollada. La subregión pampeana Baja se extiende hacia el Sur del río La Matanza siendo una zona transicional hacia la Pampa Deprimida. La red de drenaje es poco densa y menos definida y las ondulaciones del terreno son menos notorias que en la Alta.


La Pampa Ondulada se caracteriza por estar cubierta de Molisoles sobre sedimentos loésicos y pastizales (Soriano *et al.*, 1991). La naturaleza heterogénea y la gran diversidad regional de la cubierta eólica de la región ha sido poco estudiada. Zárate & Tripaldi (2012) dividieron la región central argentina en 8 unidades de origen eólico caracterizadas en función de sus rasgos geomorfológicos, geológicos y estructurales. Según estos autores, la Pampa Ondulada se caracteriza por poseer sedimentos loésicos y loessoides (loess retrabajado o depósitos equivalentes al loess). Estos mantos se distribuyen desde la Provincia de Córdoba con altitudes de aproximadamente 600 msnm descendiendo gradualmente hasta la provincia de Buenos Aires donde llega a 30 msnm en el Río Paraná. Esta disposición geomorfológica general es el resultado de la geología subsuperficial que consiste en varios bloques tectónicos hacia el este desde las cordilleras pampeanas, cubiertos por un relleno sedimentario grueso. El manto de loess más reciente, con un espesor de 1,5-2 m aproximadamente, cubre sucesiones de depósitos de tipo loess del Pleistoceno medio que cubren el paisaje. Los depósitos de Loess son el material parental principal de

los suelos presentes (INTA, 1990). El loess de la Pampa Ondulada es predominantemente volcanoclástico derivado de la región andina. Incluye también, porcentajes menores de partículas de fuentes locales como las cordilleras pampeanas, la cuenca del río Paraná y probablemente los afloramientos precámbricos uruguayos.

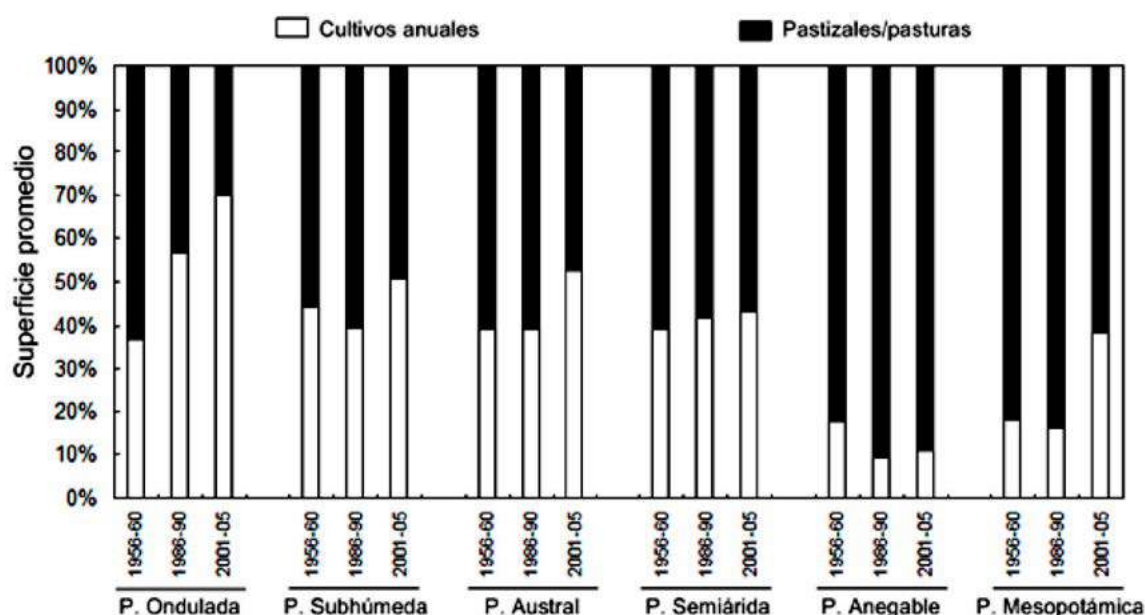
La composición mineralógica del loess de la Pampa Ondulada de la Formación Buenos Aires es plagioclasas cálcicas frescas a intermedias, cuarzo, fragmentos líticos (rocas graníticas y metamórficas, cuarzo argilizado, pórfiros y basalto) y fragmentos de vidrio volcánico. En cuanto a los minerales arcillosos se encuentran illita, montmorillonita y caolinita (Zárate, 2003). Dataciones recientes con técnicas novedosas como la luminiscencia óptica estimulada, indicaron que la parte superior de depósitos de loess y loessoides (3-10 m) son del último ciclo glacial. Las tasas de acumulación de loess decrecieron significativamente hace 9000-10000 años cuando comenzó la formación actual de los suelos de la región Zárate & Tripaldi (2012).

A consecuencia del origen loésico, gran parte de los suelos de la Pampa Ondulada presentan un importante contenido de limo (2-50  $\mu\text{m}$ ) jugando un rol clave en las propiedades físico-químicas de los suelos actuales (Cosentino & Kraemer, 2017). Los suelos cultivados de la región pampeana han sufrido un gran proceso de deterioro físico, debido en parte a la presencia de una alta cantidad de limos en su matriz (Pecorari *et al.*, 1990). La abundancia de esta fracción genera alta sensibilidad a la degradación física que se manifiesta por la formación de estructuras masivas, encostramiento superficial y disminución de la porosidad estructural (Wischmeier *et al.*, 1971). Muchos suelos pampeanos son de textura franco limosa cuya elevada proporción de limo fino en superficie (50-67%) les confiere casi nula capacidad de expansión y contracción, debido a su pequeño diámetro (2-20  $\mu\text{m}$ ) los suelos poseen poca macroporosidad con serios problemas de resiliencia una vez que perdieron su condición natural (Taboada, 2008). Pecorari *et al.* (1990) y Cosentino & Pecorari (2002), en experimentos de laboratorio, establecieron que la abundancia de biolitos y vidrios volcánicos en la fracción limo fino de los suelos pampeanos (> 30%) que poseen porosidad lacunar, tendría consecuencias negativas desde el punto de vista físico. La existencia de estos limos de baja densidad disminuye la densidad de partícula y aumenta la porosidad textural y la debilidad estructural del ensamblaje del esqueleto con la arcilla en un amplio rango de contenidos hídricos, generando un efecto negativo sobre su resistencia mecánica a la ruptura influenciando también la estabilidad estructural de estos suelos (Cosentino & Kraemer, 2017).

Los suelos más comunes y representativos de la Pampa Ondulada Alta son los Argiudoles típicos (Soil Survey Staff, 2010). Estos tienen un epipedón mólico con 3 % de materia orgánica aproximadamente, con un horizonte argílico profundo con contenidos de arcilla que varían entre 30 % al oeste a 50% al este, y el *solum* de 120 cm o más. Nódulos y concreciones de carbonato de calcio frecuentemente ocurren en el horizonte BC. En la Pampa Ondulada Baja, transicional a la Pampa Deprimida, son más comunes los Argiudoles ácuicos y vérticos y son frecuentes los Hapludertes. Los Vertisoles se encuentran en las partes más altas del relieve (Morrás & Moretti, 2016). Los Argiudoles ácuicos y Argialboles están presentes en las microdepresiones.

Los suelos de la región pampeana fueron cultivados desde fines del siglo XIX o principios del siglo XX (Soriano *et al.*, 1991). La Pampa Ondulada es la subregión pampeana donde el proceso de agriculturización se dio con mayor intensidad. El área con pastizales y pasturas decreció desde 66% en 1956-1960 a 43 % en 1986-1990 a 30 % en 2001-2005 **Figura 1** . El ganado bovino fue desplazado

a áreas subtropicales de la Argentina, y los terneros son engordados con alta proporción de granos o en sistemas feedlot (Paruelo *et al.*, 2005; Viglizzo *et al.*, 2010).



**Figura 1:** Proporción promedio de la superficie destinada a cultivos anuales y pastizales/pasturas en las subregiones de la región pampeana: Pampa Ondulada, Pampa Subhúmeda, Pampa Austral, Pampa Semiárida, Pampa Anegable y Pampa Mesopotámica, para los años: 1956/60, 1986/90, 2001/05.

**Figure 1:** Average proportion of the areas devoted to annual crops and grasslands/pastures in the sub-regions of the pampean region: Rolling Pampa, Subhumid Pampa, Southern Pampa, Semiarid Pampa, Flooding Pampa y Mesopotamian Pampa, for: 1956/60, 1986/90, 2001/05.

Tradicionalmente, los sistemas integrados agrícola-ganaderos fueron el sistema productivo principal de la Región Pampeana, manejado con labranza convencional durante el periodo agrícola (Soriano *et al.*, 1991; Senigagliesi & Ferrari, 1993). La labranza convencional lleva a la pérdida de materia orgánica (MO), a un decrecimiento de la estabilidad estructural y un incremento de la erosión del suelo (García Préchac *et al.*, 2004). Estos procesos se vieron intensificados en la década del 70' donde ocurrió una mayor agriculturización con laboreo de suelos.

Los diferentes métodos de labranza poseen ventajas y desventajas en un sistema de producción determinado. En la Región Pampeana, como en otras regiones templadas del mundo, el reemplazo de labranza convencional (LC) por la SD resultó en un mejor control de la erosión, conservación del agua, ciclado de nutrientes, ahorro de tiempo operativo, reducción del uso de combustibles fósiles y aumento del secuestro de carbono en el suelo (Díaz Zorita *et al.*, 2002; Bolliger *et al.*, 2006; Steinbach y Álvarez, 2006; Lal *et al.*, 2007; Strudley *et al.*, 2008). Estos fueron los principales factores responsables de la amplia adopción de la SD en Argentina a partir de la década de los 90'. Pero la SD, vino acompañada por la agricultura continua, con aplicación de herbicidas (e.g. glifosato, atrazina) para obtener un barbecho limpio, libre de malezas y un esquema de alta predominancia de soja rotado en baja proporción con maíz (*Zea mays L.*) (Paruelo *et al.*, 2005; Viglizzo *et al.*, 2010). Desde todo punto de vista, estos sistemas presentan baja sustentabilidad. En lo que respecta al suelo el cultivo de soja presenta un bajo aporte de residuos en términos de cantidad, sumado a la rápida descomposición de este residuo debido a su baja relación C/N, conduce a una baja cobertura durante todo el año (Sanford, 1982; Bathke & Blake, 1984).

La siembra directa en los sistemas agrícolas con escasa rotación y ocupación del lote con cultivos no resultaron ser la solución para la mejora desde las propiedades físicas de los suelos de la región (Andriulo & Cardone, 1998; Diaz-Zorita *et al.*, 2002; Sasal *et al.*, 2006; Micucci & Taboada, 2006; Alvarez *et al.*, 2009). Similares resultados fueron hallados en suelos bajo manejo de siembra directa en Sudamérica (García-Préchac *et al.*, 2004; Bolliger *et al.*, 2006) y Norte América (Franzluebbers & Follet, 2005; Martens *et al.*, 2005). En muchos casos, el camino de resolución de esta problemática fueron prácticas de remediación, mediante el uso de escarificadores (partill, paraplow, cultivie, etc.), siendo ésta una solución de corto plazo.

Esto planteó la necesidad de la búsqueda de esquemas de producción que eviten procesos de compactación o mejoren la calidad física del suelo. La reintroducción de sistemas integrados agrícolas-ganaderas en siembra directa ha sido considerada una alternativa con características más sustentables, en los cuales se incorporan las pasturas a la rotación. La integración de la agricultura con la ganadería permite aumentar la capacidad buffer de los agroecosistemas frente a cuestiones climáticas y económicas (Viglizzo, 1986). La inclusión de pasturas perennes en la rotación restaura las propiedades suelo que son afectadas durante el período agrícola. Esto contribuiría al incremento del CO (Studdert *et al.*, 1997; Miglierina *et al.*, 2000; Gentile *et al.*, 2005) por la gran producción de biomasa aérea y de raíces (Tisdall & Oades, 1982), el cual conduce a mejorar la estructura y la estabilidad del suelo (Studdert *et al.*, 1997). Así, la presencia de la pastura en rotación combinado con la siembra directa llevaría al incremento neto de CO (Siri-Prieto & Ernst, 2010).

En el presente capítulo se presentarán estudios desarrollados por el grupo de investigación (FAUBA-INTA Castelar) sobre la evolución de la calidad física de los suelos bajo distintos manejos de la región en forma comparativa, entre sistemas de labranzas, entre sistemas agrícolas y sistemas agrícola-ganaderos en ambos casos bajo siembra directa, rotaciones y prácticas de remediación y prevención de la compactación antrópica.

## ■ CALIDAD FÍSICA EDÁFICA EN LA PAMPA ONDULADA

Una buena calidad física del suelo determina una alta resistencia a la degradación por acción de agentes externos, y a su vez, un ambiente favorable para el desarrollo de las raíces y de la biota del suelo y una adecuada capacidad de proveer agua. La calidad física del suelo está determinada genéticamente (calidad intrínseca) y también es modificada por el manejo antrópico (calidad dinámica o salud del suelo) (Álvarez & Taboada, 2008).

## ■ RESISTENCIA A LA DEGRADACIÓN

La resistencia a la degradación se refiere a la estabilidad del suelo frente a los agentes erosivos (agua y viento) y frente a la acción antrópica (laboreo, tránsito, etc.). Dos propiedades fundamentales que permiten la caracterización de la resistencia a la degradación son la estabilidad estructural y la presencia de cobertura viva o muerta (rastrojo) del suelo. La estabilidad estructural es utilizada frecuentemente para evaluar el efecto de distintos manejos del suelo, como labranzas, y su estabilidad frente a la erosión. Los métodos de estabilidad se basan todos en aplicar fuerzas disruptivas al suelo, y tratar de relacionar el tamaño de agregados resultante con la susceptibilidad del suelo para soportar un estrés determinado, sea



generado por el viento o por el agua (Díaz Zorita *et al.*, 2002; 2007). Una de las metodologías es la *inestabilidad estructural* por De Leenheer y De Boodt. En esta metodología el valor de inestabilidad estructural surge de la diferencia entre diámetro medio ponderado del tamizado en seco y del tamizado en húmedo y su expresión es en milímetros y cuanto mayor es su valor mayor es el riesgo de degradación.

En la Pampa Ondulada el grupo de investigación realizó dos relevamientos de propiedades físicas edáficas a escala regional en lotes de producción (Álvarez *et al.*, 2009 y Fernández *et al.*, 2011 integrados en Álvarez *et al.*, 2012). En este capítulo se presenta el resultado del muestreo de 67 situaciones localizadas en el Norte de Buenos Aires y el Sur de Santa Fe bajo distintos manejos, según: referencias, sistemas en agricultura continua en labranza convencional (AGR-LC), o en siembra directa (AGR-SD), y sistemas mixtos en siembra directa (MIXTOS-SD). En la **Tabla 1** se describen las situaciones evaluadas en relación a su composición granulométrica y carbono orgánico total (COT).

**Tabla 1:** Valor promedio  $\pm$  error estándar de las distintas propiedades edáficas evaluadas de 0-15 cm bajo los distintos manejos: agricultura continua y siembra directa (AGR-SD); agricultura continua y laboreo conservacionista (AGR-LC), mixtos en siembra directa (4 años pastura y 8 agricultura; MIXTO-SD) y situaciones cuasi-prístinas correspondientes a cascos (REFERENCIA), en la región pampeana norte de Argentina. COT= carbono orgánico total. Entre paréntesis se indican el valor mínimo y máximo (Alvarez *et al.*, 2012).

**Table 1:** Mean value of different soil properties (0-15 cm)  $\pm$  standard deviation under different management: continuous agriculture under no tillage (AGR-SD); continuous agriculture under conservation tillage (AGR-LC), integrated livestock agriculture systems under no tillage (4-yr pasture and 8-yr agriculture; MIXTOS-SD) and quasi pristine situations (REFERENCIAS) in the North pampean region of Argentina. COT= organic carbon, arena= sand, arcilla= clay and limo= silt. Minimum and maximum values are given within parenthesis (Alvarez *et al.*, 2012).

	Arena (g kg <sup>-1</sup> )	Arcilla (g kg <sup>-1</sup> )	Limo (g kg <sup>-1</sup> )	COT (g kg <sup>-1</sup> )
<b>REFERENCIA</b> (n= 6)	282 $\pm$ 24 (206-370)	210 $\pm$ 20 (122-250)	507 $\pm$ 11 (465-544)	27 $\pm$ 0.9 (25-30)
<b>MIXTOS-SD</b> (n= 11)	335 $\pm$ 53 (110-580)	181 $\pm$ 19 (77-264)	485 $\pm$ 37 (342-682)	18 $\pm$ 1.2 (14-26)
<b>AGR-SD</b> (n= 32)	268 $\pm$ 26 (56-627)	225 $\pm$ 10 (127-335)	507 $\pm$ 19 (243-687)	19 $\pm$ 0.5 (11-28)
<b>AGR-LC</b> (n= 18)	240 $\pm$ 23 (63-420)	233 $\pm$ 8 (175-290)	526 $\pm$ 17 (380-647)	20 $\pm$ 0.6 (15-24)
Valor P	0,35	0,06	0,62	<0,01

La inestabilidad estructural presentó un gradiente de diferenciación entre manejos **Figura 2**. Las medias muestran una progresión creciente según: REFERENCIA < MIXTOS-SD < AGR-SD < AGR-LC.

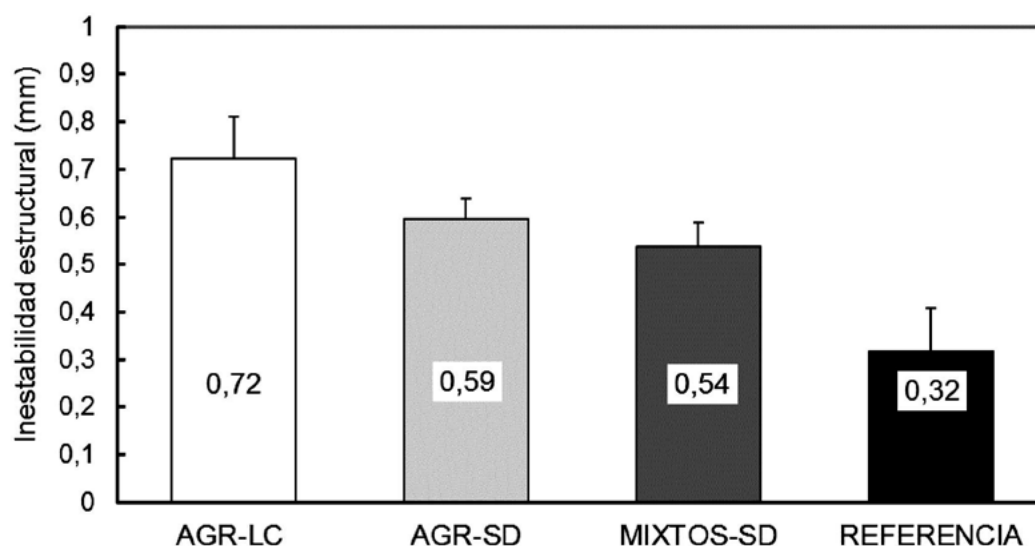
A partir de estos datos se obtuvo un modelo de regresión múltiple que permitió explicar el 37 % de las variaciones de la IEST, según:

$$\text{IEST (mm)} = 0,556 - 0,033 \text{ COT (gkg}^{-1}\text{)} + 0,161 \text{ MANEJO} + 0,00129 \text{ LIMO (gkg}^{-1}\text{)};$$

$$R^2 = 0,37; n = 67.$$

Donde:

IENT es inestabilidad estructural según De Boodt y DeLeehneer; COT es el contenido de carbono orgánico del suelo, MANEJO es una variable Dummy que adquiere el valor de 1 para sistemas agrícolas laboreados y de 0 para sistemas sin remoción (siembra directa agrícolas o mixtos y situaciones prístinas) y LIMO es el contenido de la fracción limo del suelo.



**Figura 2:** Inestabilidad estructural bajo distintos sistemas de manejo de 0-15 cm (Álvarez *et al.*, 2012a).

AGR-LC: agricultura continua con laboreo conservacionista por más de 10 años (18 lotes), AGR-SD: agricultura continua en siembra directa entre 5 y 18 años (32 lotes), MIXTOS-SD: sistemas mixtos en siembra directa con 8 años de agricultura y 4 de pastura (11 lotes) y REFERENCIAS: cascotes o parques de estancia (6 situaciones). Letras distintas indican diferencias significativas  $P < 0,05$ . Los números en las barras indican el valor medio de la inestabilidad en cada situación. Las barras verticales indican el error estándar.

**Figure 2:** Structural instability under different management (0-15 cm) in the North pampean region. Continuous agriculture under conservation tillage (AGR-LC; 18 cases), continuous agriculture under no tillage (AGR-SD; 32 cases), integrated livestock-agriculture systems under no tillage (4-yr pasture and 8-yr agriculture; MIXTOS-SD; 11 cases) and quasi pristine situations (REFERENCIAS; 6 cases). Different letters indicated significant differences ( $P < 0.05$ ) and bars indicated standard deviations. Mean values are given for each management.

Las propiedades que ingresaron en el modelo fueron carbono orgánico total (COT), limo y una variable Dummy asociada al manejo. La misma le otorga un valor mayor de IEST a los sistemas AGR-LC respecto del resto. El efecto negativo del limo sobre la estabilidad estructural se relaciona con la composición y el origen de esta fase sólida del suelo. Por lo menos, la mitad de los limos están en el rango 2 - 20  $\mu\text{m}$  (i.e. limo fino), que son biolitos o vidrios volcánicos (Cosentino & Pecorari, 2002). Estas partículas tienen porosidad lacunar, que otorga a los suelos baja resistencia a la tracción y alta susceptibilidad a la degradación por erosión, laboreo o tránsito (Cosentino & Pecorari, 2002). El alto contenido de limo ha sido mencionado como la causa de la baja resiliencia de los suelos franco limosos de la región (Taboada *et al.*, 2008). Si bien el ajuste es estadísticamente significativo, una proporción importante de la varianza no es explicada por las variables que ingresaron en el modelo. La varianza restante puede ser atribuible a otros factores, pudiendo señalarse entre ellos a los efectos bióticos de las raíces y a los de la meso y macrofauna (Dexter, 1988; Oades, 1993). De este modelo surgen recomendaciones importantes de manejo que tienen como eje común realizar altos aportes de materia orgánica (doble cultivos, pastura, cultivos de alto aporte),

la presencia de raíces vivas todo el año (pastura, doble cultivo), no mover el suelo (pastura, siembra directa), y cobertura. A su vez, los suelos limosos requieren mayor atención para sostener la estabilidad estructural derivado de su genética.

## ■ AMBIENTE FAVORABLE PARA DESARROLLO RADICAL Y LA BIOTA DEL SUELO

Un ambiente favorable para el desarrollo radical y la biota edáfica se refiere a que el suelo esté, principalmente, libre de impedancias mecánicas. El término impedancias mecánicas se relaciona con la existencia y/o desarrollo de capas con elevadas densidades aparente y/o resistencias a la penetración en los suelos, o presencia de estructuras desfavorables capaces de afectar negativamente y/o impedir el crecimiento de los cultivos a través de efectos directos (e.g. menor emergencia de plántulas; menor crecimiento de raíces) e indirectos (e.g. desarrollo de anoxia por compactación; reducción del acceso a nutrientes).

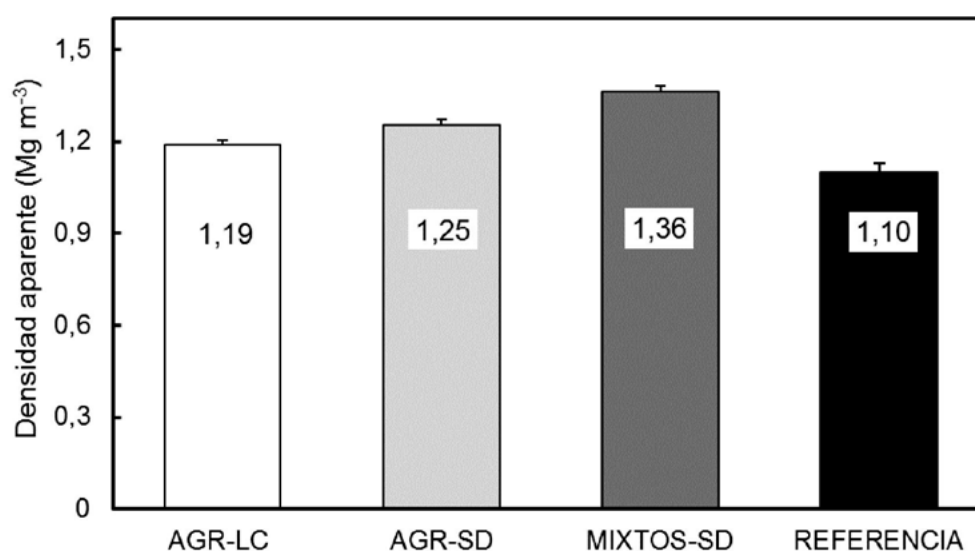
Debido a los sistemas dominantes de producción en la región las impedancias antrópicas más importantes son: la compactación por tránsito de maquinarias de siembra directa y la compactación por pisoteo animal. Los suelos bajo producción agrícola están expuestos a la aplicación de fuerzas de estrés debido al tránsito de maquinaria. Mientras que antes el predominio de labranzas como práctica de preparación del suelo permitía borrar el efecto del tránsito, bajo siembra directa la ausencia de labranza en los primeros centímetros del suelo acumula los efectos del tránsito de maquinaria.

La integración de la agricultura con la ganadería en siembra directa en esta región implica el pastoreo directo en la pastura y el pastoreo de los residuos de cosecha y de las malezas. En estos sistemas, el ganado puede producir cambios en las propiedades físicas del suelo que conducen a procesos de compactación y así generar efectos negativos sobre la estructura del suelo. El impacto depende del estrés aplicado (carga, tiempo, especie animal) y del suelo (humedad, textura, MO). En planteos mixtos bajo siembra directa si bien se agrega el estrés del pisoteo animal, durante la pastura la presencia de raíces, mayor aporte de carbono y la actividad biológica podrían contribuir a atenuar el estrés adicional producido por el pastoreo.

## Densidad aparente

La densidad aparente (DAP) se define como la masa por unidad de volumen de suelo y el método más utilizado para su determinación en nuestro país es el método del cilindro. Este valor contempla tanto la fase sólida del suelo como el volumen de poros relacionados. La textura del suelo, el contenido de MO y el manejo producen variaciones en el valor de densidad aparente. En Alvarez *et al.* (2012) se comparó el efecto sobre la DAP de diferentes condiciones de producción agricultura continua con laboreo (AGR-LC) o en siembra directa (AGR-SD), sistemas mixtos en siembra directa (MIXTOS-SD) y referencias. Los sistemas bajo agricultura continua implican una sucesión de cultivos de verano (maíz-soja ó soja-soja) bajo siembra directa. Los sistemas integrados agrícola-ganaderos se alternan maíz y soja durante 8 años, y luego son seguidos por una pastura consociadas de gramíneas y alfalfa durante 4 años. Durante el invierno, el ganado pastorea con una carga de 1,1 vacas/ha, con una carga instantánea de 30-40 vacas/ha. En esta última situación se muestreó en la mitad del período agrícola. La DAP presentó variaciones asociadas al manejo, siendo mayor en los sistemas MIXTO-SD que en el resto de las

situaciones evaluadas ( $\text{AGR-SD} \geq \text{AGR-LC} \geq \text{REFERENCIAS}$ ) **Figura 3**. Es importante remarcar, que en ningún caso se alcanzaron valores críticos en los que se afectaría el crecimiento y desarrollo radical (tomando un umbral de  $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ , Pilatti & Orellana, 2000). Es frecuente encontrar en esta región valores no muy altos de densidad aparente tal vez por la composición textural de los suelos y los limos de baja densidad (Álvarez *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2011).



**Figura 3:** Densidad aparente bajo distintos manejos de 0-15 cm en la región pampeana norte. Agricultura continua y laboreo conservacionista (AGR-LC), agricultura continua y siembra directa (AGR-SD), mixtos en siembra directa (4 años pastura y 8 agricultura; MIXTO-SD) y situaciones cuasi-prístinas correspondientes a cascos (REFERENCIA). Letras distintas indican diferencias significativas al 5 %; las barras indican el error estándar. Se indican los valores medios para cada situación (Álvarez *et al.*, 2012).

**Figure 3:** Soil bulk density under different managements (0-15 cm) in the North pampean region. Continuous agriculture under conservation tillage (AGR-LC), continuous agriculture under no tillage (AGR-SD), integrated livestock-agriculture systems under no tillage (4-yr pasture and 8-yr agriculture; MIXTOS-SD) and quasi pristine situations (REFERENCIA). Different letters indicate significantly statistic differences and bars standard deviations. Mean values are given for each management (Álvarez *et al.*, 2012)

Para estas mismas situaciones se calculó la compactación relativa **Tabla 2** calculada como:

$$\text{CR \%} = \text{DAP} \cdot 100 / \text{DAPMAX}$$

Donde:

CR es compactación relativa según test de Proctor; DAP es densidad aparente hallada en el campo; DAPMAX es densidad máxima del suelo obtenido por el test Proctor.

Carter (1990) y Beultler & Centurion (2004) hallaron como rango óptimo de CR 73-86 % y como crítica > 90 % para trigo y soja. En tal sentido, el valor medio del MIXTOS-SD alcanzó el valor crítico y en todos los sistemas agrícolas hay situaciones que alcanzan valores críticos. Reichert *et al.* (2009) propuso límites críticos más altos para los suelos en SD. Es necesaria mayor investigación para determinar valores óptimos y críticos en la Región Pampeana ya que la mayor parte de los suelos son manejados en SD.

**Tabla 2:** Valor promedio  $\pm$  error estándar, mínimo y máximo de la compactación relativa evaluada de 0-15 cm bajo los distintos manejos: agricultura continua y siembra directa (AGR-SD); agricultura continua y laboreo conservacionista (AGR-LC), mixtos en siembra directa (4 años pastura y 8 agricultura; MIXTO-SD) y situaciones cuasi-prístinas correspondientes a cascos (REFERENCIA), en la región pampeana norte de Argentina (Álvarez *et al.*, 2012).

**Table 2:** Average value  $\pm$  standard error, minimum and maximum of the relative compaction evaluated 0-15 cm under the different management: continuous agriculture under no tillage (AGR-SD); continuous agriculture under conservation tillage (AGR-LC), integrated livestock-agriculture systems under no tillage (4-yr pasture and 8-yr agriculture, MIXTO-SD) and quasi pristine situations (REFERENCIA), in the Northern pampas region of Argentina (Álvarez *et al.*, 2012).

	Compactación relativa (%)			
	Media	Error estandar	Mínimo	Máximo
<b>REFERENCIA</b> (n= 6)	78	$\pm 2,3$	66	82
<b>MIXTOS-SD</b> (n= 11)	90	$\pm 1,7$	82	98
<b>AGR-SD</b> (n= 32)	87	$\pm 1,3$	74	100
<b>AGR-LC</b> (n= 18)	84	$\pm 1,1$	78	96

La variabilidad de la DAP pudo ser explicada en un 64 % por un modelo de regresión múltiple. La DAP estuvo relacionada negativamente con la arcilla y con el COT, y se relacionó positivamente con una variable Dummy asociada al manejo. En este caso la variable manejo adquirió un coeficiente de 1 para los sistemas MIXTOS-SD, indicando un aumento de la DAP cuando el manejo incluía ganado.

Siendo el modelo:

$$DAP \text{ (t m}^{-3}\text{)} = 1,65 - 0,00047 \text{ ARCILLA (gkg}^{-1}\text{)} - 0,016 \text{ COT (gkg}^{-1}\text{)} + 0,09 \text{ MANEJO};$$


$$R^2 = 0,62; P < 0,01$$

Donde:

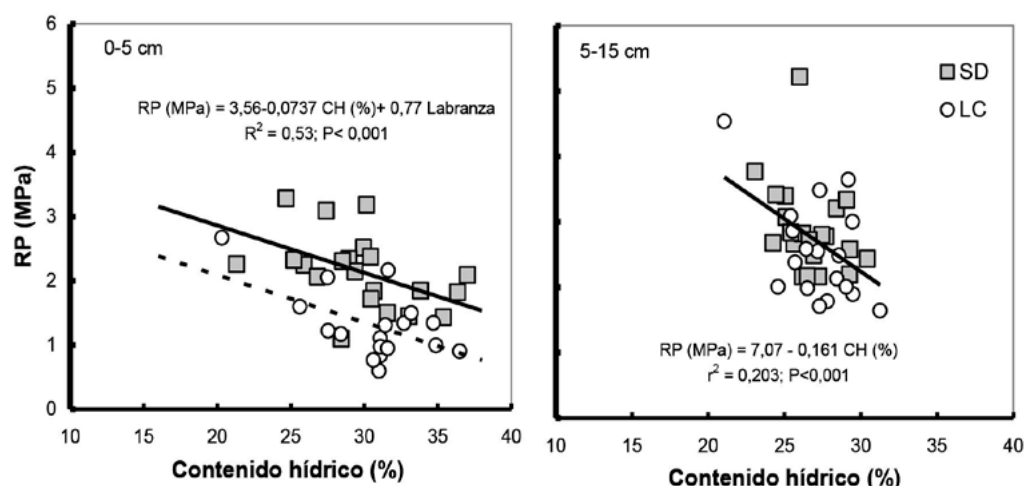
DAP es densidad aparente según el método del cilindro; COT es el contenido de carbono orgánico del suelo, MANEJO es una variable Dummy que adquiere el valor de 1 para sistemas MIXTOS-SD y 0 para el resto de los manejos y ARCILLA es el contenido de la fracción arcilla del suelo.

## Resistencia a la penetración

La resistencia del suelo se relaciona con la penetrabilidad, la cual se define como la fuerza requerida para introducir un elemento en el suelo. Para determinar con precisión la resistencia del suelo, se recurre al uso de penetrómetros. Hay factores que hacen que la comparación de situaciones y/o la integración de datos de trabajos realizados por distintos autores presente dificultades. Uno es que hay instrumentos que presentan diferencia en sus ángulos de la punta cónica (30° ó 60°). Otro factor es que la resistencia a la penetración varía con la humedad edáfica. Por lo cual, para comparar la resistencia a la penetración hay que hacerlo con igual humedad y ello implica en algunas circunstancias tener que corregir la resistencia a la penetración por la humedad necesitando tener la función que relacione ambas variables.

Álvarez *et al.* (2009) observaron que los suelos manejados con SD presentaban mayor resistencia a la penetración de 0 a 5 cm (+0,77 MPa) **Figura 4**  comparado con los suelos laboreados. Sin embargo, de 5-15 cm no se encontraron diferencias. Ello puede deberse que al evaluarse dicha profundidad se confunde la zona endurecida de SD con la presencia de piso de rastra de disco de la labranza reducida. Del mismo modo,

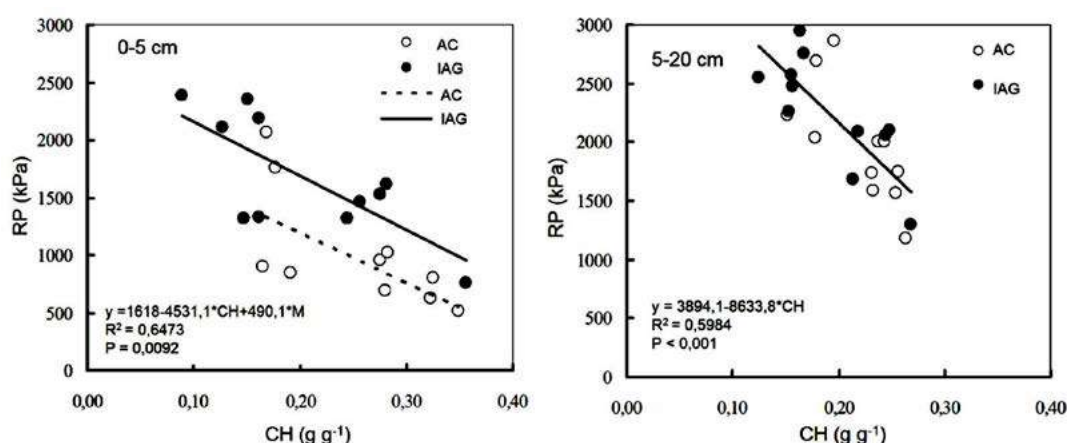
Alvarez & Steinbach (2009) en su revisión de los ensayos de labranza de la Región Pampeana encontraron que los suelos bajo siembra directa presentaron mayor índice de cono que los manejados con arado de reja y vertedera; mostrando una situación intermedia los manejados con labranza reducida y vertical.



**Figura 4:** Resistencia a la penetración (RP) y su relación con el contenido hídrico del suelo para dos profundidades de muestreo evaluado en lotes de producción. siembra directa: siembra directa; LC: labranza convencional (para la región es labranza reducida o vertical). Labranza: variable Dummy con valor 1 para siembra directa y valor 0 para LC (Álvarez *et al.*, 2009).

**Figure 4:** Penetration resistance (RP) and its relation with the soil water content for two sampling depths evaluated in production fields. siembra directa: no tillage; LC: conventional tillage (for the region it is reduced or vertical tillage). Tillage: Dummy variable with value 1 for siembra directa and value 0 for LC (Alvarez *et al.*, 2009)


En Fernández *et al.* (2011) se presentó un muestreo regional en los que se comparó sistemas bajo agricultura continua en siembra directa y los sistemas integrados agrícolas-ganaderos. En el mismo, se encontró una fuerte relación entre la resistencia a la penetración y el contenido hídrico. Mientras que en el estrato 5-20 cm se pudo ajustar una regresión lineal para el conjunto de los manejos, para el estrato 0-5 cm el manejo integrado agrícola ganadera presentó mayor dureza del suelo (490 kPa) para todo el rango de contenidos hídricos explorados **Figura 5**.

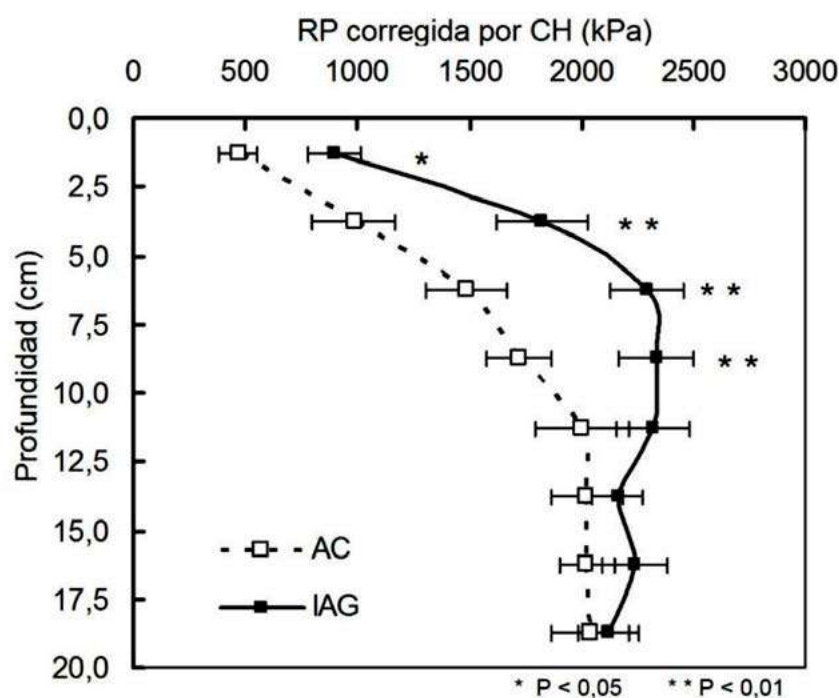


**Figura 5:** Relación entre la resistencia a la penetración (RP) y el contenido hídrico del suelo (CH) en diferentes profundidades (0-5 cm y 5-20 cm). AC: agricultura continua; ICL: integrados agrícolas-ganaderos. Variables dummy para manejo del suelo (M): CC = 0, ICL = 1. (Fernández *et al.*, 2011)

**Figure 5:** Relationship between penetration resistance (RP) and soil water content (CH) at different soil depths (0-5 cm and 5-20 cm). AC, Continuous cropping; IAG, integrated crop–livestock. Dummy variable to soil management (M): CC = 0; ICL = 1. (Fernández *et al.*, 2011)



La resistencia a la penetración fue una variable del suelo que permitió distinguir entre los manejos (Fernández *et al.*, 2011). La resistencia a la penetración, corregida por la humedad promedio del muestreo, presentó diferencias entre manejos dentro de los 7,5 cm de profundidad, siendo superiores los valores hallados para los sistemas mixtos **Figura 6** , pero el efecto del pastoreo estuvo restringido a superficie. Los valores críticos (> 2000 kPa) se encuentran a partir de los 5 cm en los sistemas mixtos y predominan en los estratos más profundos para agricultura continua.




**Figura 6:** Resistencia a la penetración corregida por el contenido hídrico promedio (RP corregida por CH) en función de la profundidad, para diferentes manejos: agricultura continua bajo siembra directa (AC); sistemas integrados agrícola ganaderos bajo SD (IAG). Barras horizontales indican errores estándar (Fernández *et al.*, 2011).

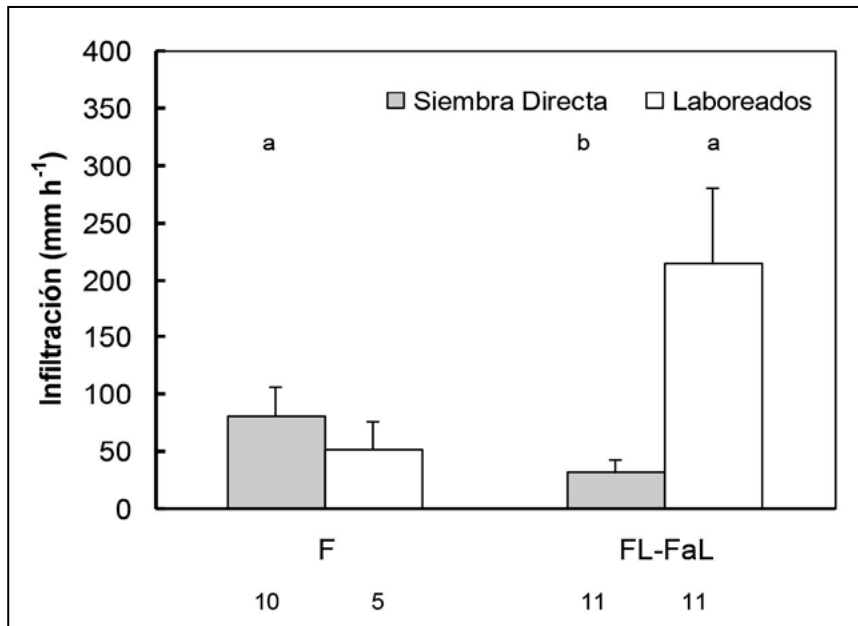
**Figure 6:** Soil penetration resistance corrected by soil water content (RP corregida por CH) in relation to depth, under AC (continuous cropping) and IAG (integrated crop–livestock) systems. Horizontal bars represent standard error. (Fernández *et al.*, 2011).

En resumen, no se observan cambios importantes de la densidad aparente entre distintos manejos, tanto sea entre sistemas de labranza como entre sistemas mixtos y agrícolas en SD, y no se alcanzan valores críticos (Álvarez *et al.*, 2009; Fernández *et al.*, 2011; Álvarez *et al.*, 2012). Sin embargo, se observan aumentos de la RP en superficie en SD comparado con suelos laboreados y en sistemas mixtos comparado con agricultura continua en SD. En muchos casos se observan valores de RP superiores a distintos límites críticos citados por la literatura. En consecuencia, se ha encontrado que el proceso presente en SD agrícolas o mixtos es el de endurecimiento superficial (“*topsoil hardening*”).

## Estructuras desfavorables

La estructura laminar produce un efecto negativo sobre la infiltración de agua al suelo y sobre el crecimiento de las raíces. Álvarez *et al.* (2009) en el muestreo realizado en lotes de producción hallaron una interacción entre la textura de los suelos y el manejo sobre la tasa de infiltración **Figura 7** . Esto significa que pueden esperarse mejoras en tasa de infiltración en los suelos francos bajo SD, pero no así

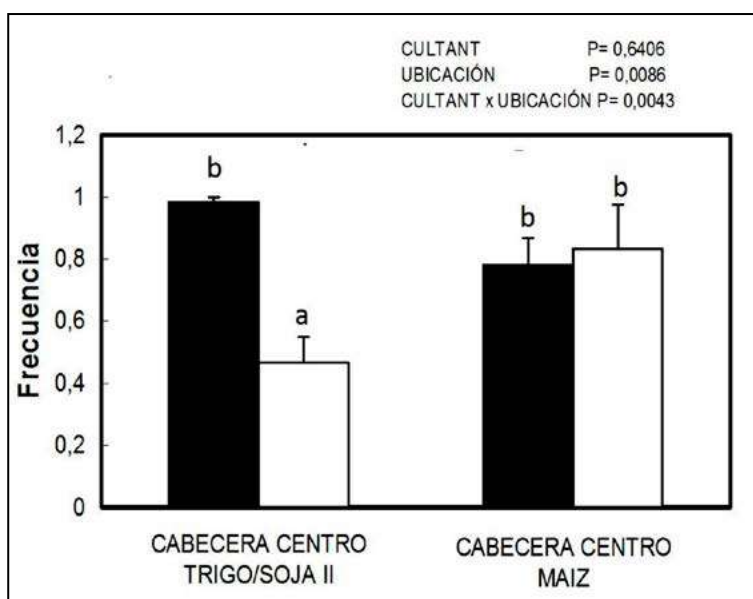
en los suelos franco limosos y franco arcillo limosos. Esto estuvo asociado con la presencia de estructuras laminares en los primeros centímetros de los suelos (Álvarez *et al.*, 2012b). Opuesto a lo encontrado en nuestra región, varios autores hallaron aumentos de tasa de infiltración por siembra directa, los cuales fueron atribuidos a la formación de bioporos estables, lo cual comienza a ser hallado a partir de 5 años de implementación de siembra directa (Hubert *et al.*, 2007). El impacto negativo de la siembra directa sobre la tasa de infiltración encontrados en nuestro trabajo coincide con otros trabajos de años recientes (Sasal *et al.*, 2006; Strudley *et al.*, 2008).



**Figura 7:** Tasa de infiltración para los distintos suelos y manejos. La letra indica las diferencias de manejo dentro de cada clase textural ( $P = 0,05$ ). F: textura franca, FL-FaL: textura franca limosa y franca arcillo limosa.

**Figure 7:** Infiltration rate for different soils and managements. Different letters indicates statistical differences between management within each textural class ( $P = 0.05$ ). F: loam texture, FL-FaL: silty loam and loamy silt clay textures.


Con el objetivo de profundizar en el estudio de la estructura superficial laminar encontrada en SD se realizó un censo de la estructura presente en varios lotes que diferían en los años bajo SD, cultivos antecesores inmediatos previos a la medición y materia orgánica (Álvarez *et al.*, 2012b). La frecuencia de estructura laminar presentó una interacción entre el cultivo antecesor y el tránsito. La condición que presentó menor frecuencia de láminas y mayor estructura granular correspondió al centro del lote (< tránsito) y con doble cultivo (trigo/soja de II) **Figura 8** a y b; **Figura 9** a y b.

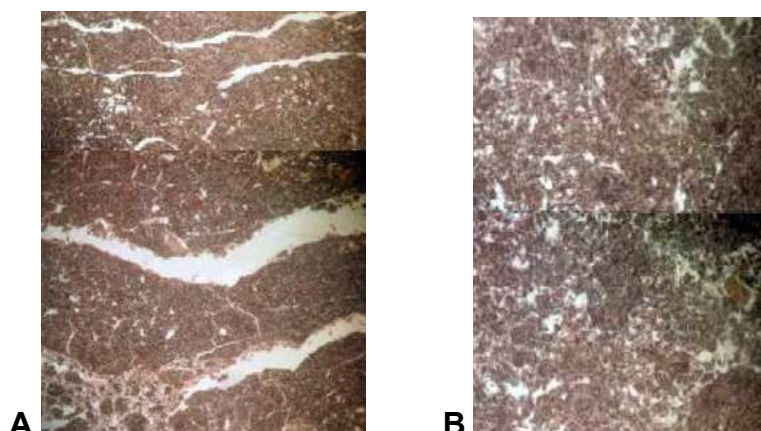


**Figura 8:** Frecuencia de estructura laminar para cultivo antecesor (CULTANT) y ubicación en el lote (UBICACIÓN). Letras distintas indican diferencias significativas entre centro y cabecera para cada antecesor evaluado (Álvarez *et al.*, 2012b).

**Figure 8:** Frequency of platy structure for previous crop (CULTANT) and location in the field (UBICACIÓN). Different letters indicate statistically differences for the center (CENTRO) and the headland (CABECERA) for each previous crop (Álvarez *et al.*, 2012b). Trigo/soja II: Wheat/soybean double crop and Maiz: maize.




En la **Figura 9**  se puede apreciar los dos tipos de estructura descritos en muestras de micromorfología correspondientes a la condición de doble cultivo en cabecera y centro.




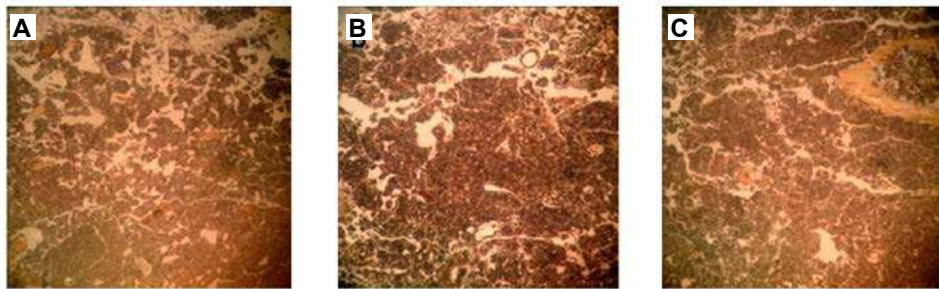
**Figura 9A:** Imágenes micromorfológicas del suelo con trigo-soja de segunda  
**B:** cabecera (> tránsito); y b: centro de lote (< tránsito) (Álvarez *et al.*, 2012b).

**Figure 9A:** Micromorphological images of the soil under wheat-soybean  
**B:** headland (> transit); and b: center (<transit) of the field (Álvarez *et al.*, 2012b).

La estructura laminar está sumamente extendida en la región y, a su vez, generalizada en los suelos limosos evaluados **Figura 10** \*1. Esta abundancia fue atribuida a la ausencia de laboreo y al colapso de macroporos creados previamente en forma mecánica. Se produce así el asentamiento y reconsolidación del suelo, conformando una estructura planar con clara dominancia de porosidad horizontal (Kay *et al.*, 1985). Estos autores sugieren que la formación abiótica de estos agregados está relacionada con los ciclos congelamiento-descongelamiento, propio de los sistemas productivos donde trabajaron. Estos ciclos terminarían consolidando este tipo de estructura laminar, debido a las lenguas de hielo que se forman dentro de estos poros.

En las condiciones ambientales de la Pampa Ondulada, carentes de ciclos de congelamiento-descongelamiento, el proceso puede ser atribuido a la formación de grietas durante la alternancia de ciclos de humedecimiento-secado, que conducen a la expansión volumétrica del suelo (Dexter, 1988; Oades, 1993). A pesar de no contar con arcillas francamente expansibles, pues la illita es la especie dominante en los suelos pampeanos, se estableció que aun así estos suelos limosos poseen cierta capacidad de cambiar de volumen durante los ciclos de humedecimiento-secado (Taboada *et al.*, 2008; Fernández *et al.*, 2012). Como resultado del humedecimiento rápido, se generan presiones de aire atrapado en los poros, que dan lugar a la formación de grietas orientadas en forma paralela al frente de humedecimiento (Fernández *et al.*, 2010). Al hallar en las cabeceras de los lotes mayor presencia de estructura laminar y con mayor espesor, independientemente del cultivo antecesor, lleva a considerar al tránsito como un factor adicional que favorece el desarrollo y persistencia de este tipo de estructura.

La reintroducción de la ganadería en Argiudoles y Hapludoles típicos podría llevar a modificaciones en las formas de los agregados y así redefinir la distribución de poros, en particular macroporos, y la continuidad y la orientación de los mismos. En la **Figura 10** \*2 se puede observar la comparación de que ofrecen las imágenes de cortes delgados de suelos bajo diferentes manejos.



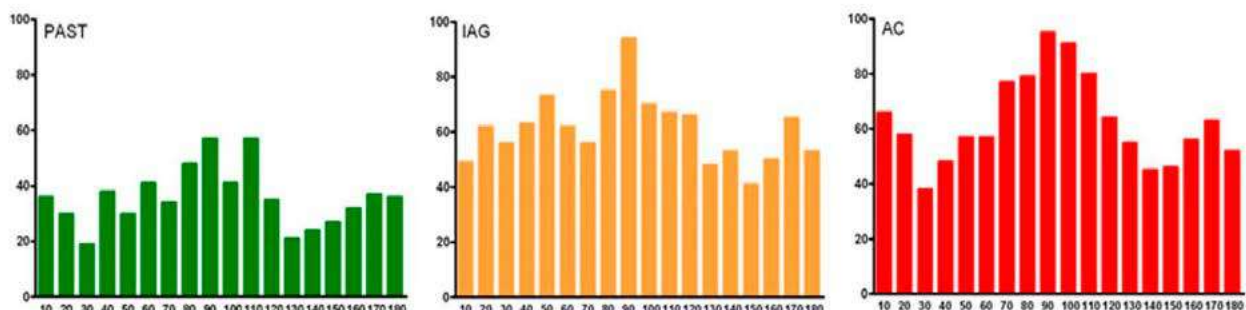
**Figura 10A:** Cortes delgados de diferentes manejos como pastura  
**B:** integrado agrícola-ganadero **C:** agricultura continua (c).

**Figure 10A:** Thin sections under different managements: pasture  
**B:** integrated agriculture-livestock **C:** continuous agriculture (c).

Nuevamente, cuando se analiza la micromorfología de todos estos tratamientos en los que la fase agrícola se realiza mediante siembra directa, presentan en los primeros 5 centímetros del suelo un modelo microestructural común constituido por tres capas de diferente organización y cuyo rasgo más característico es la microestructura laminar (Morrás *et al.*, 2004; Bonel *et al.*, 2005) **Figura 10** ☉.

En la pastura la microestructura es granular constituida por pellets fecales con huecos de empaquetamiento compuestos y algunos canales rellenos parcialmente conservados. Existiendo a su vez, algo de microestructura laminar con canales que cortan al agregado en distintas direcciones. En el sistema integrado agrícola-ganadero la microestructura es laminar y las láminas tienen asimismo una subestructura esponjosa con pequeños agregados esféricos y subangulares, presentando fisuras en diferentes orientaciones, observándose huecos de empaquetamiento en canales de empaquetamiento biológicos rellenos disturbados. Bajo agricultura continua, la microestructura es laminar con subestructura interna esponjosa resultante del empaquetamiento de pequeños agregados biológicos. En síntesis este modelo de microestructura del horizonte superficial presentó variantes dadas por el grado de actividad biológica, cuyo efecto es el incremento de varios tipos de poros y agregados relacionados con esa actividad y la modificación de la estructura laminar.

La orientación de los poros es la característica que influye directamente en los procesos de infiltración y conductividad de agua del suelo. Respecto de esta característica se encontraron situaciones disímiles entre las situaciones evaluadas **Figura 11** ☉.



**Figura 11:** Distribución de la orientación de los poros para todos los manejos evaluados.

AC (agricultura continua); IAG (Integrado agrícola-ganadero); PAST (Pastura).

**Figure 11:** Pore orientation (deviation of the horizontal in degrees) for all the evaluated management.

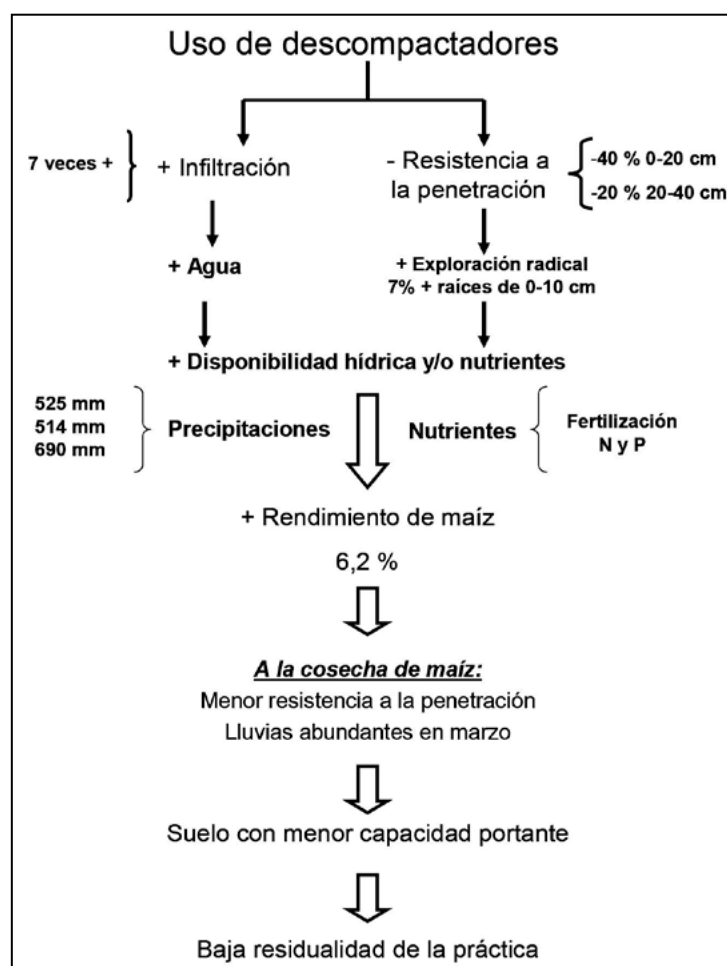
AC (Continuous Agriculture); IAG-huella (Integrated agriculture-livestock); PAST (Pasture)..

En la situación agricultura continua se observó una orientación de tipo bimodal de los poros. Los poros se concentraron en valores cercanos a 90° (orientación vertical) y en valores cercanos a 0° o 180° (orientación horizontal). Este último rasgo es característico de la siembra directa y fue descrito en numerosas ocasiones (Bonel *et al.*, 2005; Morrás *et al.*, 2008). En cuanto a los manejos ganaderos se encontró en la PAST orientaciones de poros más homogéneos, pero con una tendencia parecida a agricultura continua. El sistema integrado agrícola-ganadero o mixto, presentó orientaciones de poros más equilibradas con una leve concentración de valores correspondientes a poros verticales.

## ■ REMOCIÓN MECÁNICA DE ESTRATOS COMPACTADOS

La detección de compactación o endurecimiento superficial en siembra directa y una menor infiltración (visualizada en forma de encharcamiento temporal) ha llevado a proponer el uso de descompactadores. Los resultados presentados corresponden a lo hallado en 12 ensayos tres campañas, en suelos de Argiudoles y Hapludoles de la Pampa Ondulada, que tuvo por objetivo evaluar el impacto de la descompactación sobre el cultivo de maíz, las propiedades edáficas y su perdurabilidad en el tiempo (Álvarez, 2013).


En la **Figura 12** se resumen las características climáticas y de manejo, y los resultados hallados en los ensayos. La tasa de infiltración al momento de la siembra del maíz fue 7-veces mayor en el tratamiento descompactado que en el testigo **Figura 12**. Las diferencias en la tasas de infiltración entre tratamientos disminuyeron notablemente al momento de la cosecha del maíz. La resistencia a la penetración fue muy sensible a la práctica de descompactación mostrando una importante reducción a la siembra, en los suelos descompactados. La resistencia a la penetración se redujo en promedio un 40% de 0-20 cm y un 20% de 20-40 cm debido al efecto de la descompactación **Figura 12**. Dicha diferencia entre tratamientos se sostuvo hasta el momento previo a la cosecha del maíz. Los promedios de resistencia a la penetración, en general, no superaron los umbrales críticos máximos en los testigos. Teniendo en cuenta que el nivel de humedad edáfica era en general adecuado en todas las situaciones y profundidades no debe descartarse que los umbrales sean sobrepasados en condiciones de suelo más seco (Gupta y Allmaras, 1987; Glinski & Lipiec, 1990).

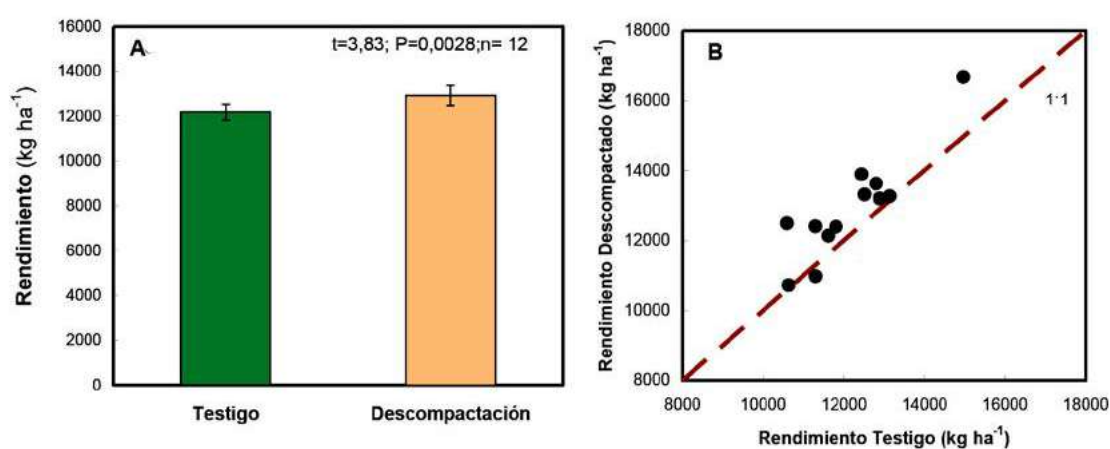


**Figura 12:** Resumen de los resultados de los 12 ensayos de descompactación. Las precipitaciones corresponden a los ciclos de maíz evaluados (Álvarez, 2013).

**Figure 12:** Summary of the results of the 12 trial of decompaction. Rainfall corresponds to the maize cycles evaluated (Álvarez, 2013).

En las dos primeras campañas se evaluó la abundancia radical hasta el metro de profundidad. Sólo se encontró diferencia en la abundancia radical en el estrato integrado de 0-10 cm, siendo 7 % mayor en el tratamiento descompactado. Se puede por lo tanto, suponer una mejora en el acceso a recursos (agua y nutrientes).

El rendimiento fue mayor en el tratamiento descompactado **Figura 13A y B** . El incremento medio fue de 754 kg ha<sup>-1</sup>; o expresado en forma relativa 6,2 %. El incremento medio varió entre -328 y 1896 kg ha<sup>-1</sup> y el relativo entre -2,9 % y 17,9 %. En términos generales, las campañas evaluadas contaron con una disponibilidad de lluvias durante el ciclo, a excepción del 2005, donde las lluvias en el período crítico fueron sustantivamente menores a las precipitaciones históricas. Los resultados obtenidos se encuadran dentro de aquellos antecedentes que hallaron beneficios por parte de la labor de descompactación (Botta *et al.*, 2006; Sadras *et al.*, 2005).



**Figura 13A:** Rendimiento promedio de los tratamientos para los 12 sitios. Las barras indican el error estándar.

**B:** Rendimientos del tratamiento testigo vs. rendimiento del tratamiento descompactado y línea 1:1 (Álvarez, 2013).

**Figure 13A:** Average performance of the treatments for the 12 sites. The bars indicate the standard error.

**B:** Yield of the control treatment vs. yield in the decompacted treatment and line 1:1 (Álvarez, 2013).

En tres de los sitios se evaluó la perdurabilidad de la práctica. Para ello se midió la resistencia a la penetración en el momento de la siembra de la soja de primera o segunda según el caso. En ese momento, luego de poco más de un año desde la descompactación, los tratamientos no se diferenciaron, sino que por el contrario el tratamiento descompactado presentaba un valor levemente superior al testigo de 0 a 5 cm.


Uno de los efectos negativos de una labor de descompactación es dejar al suelo más vulnerable (menor capacidad portante) a la aplicación de nuevos estreses compactantes. El tiempo de recompactación depende del manejo que se realiza del tránsito de maquinaria. Cuando se evaluó las condiciones del suelo durante en el momento previo a la cosecha del cultivo de maíz que se sembró sobre el suelo descompactado, aún presentaba efectos de la labor realizada meses atrás. El escenario hídrico en la cosecha de ese cultivo de maíz fue extremadamente húmedo pues las precipitaciones en marzo alcanzaron los 250 mm. Por lo tanto, la cosecha del cultivo se efectuó con el suelo con mínima capacidad portante. Un escenario de alta intensidad de tránsito no controlado y altos rendimientos del maíz pudo haber contribuido a determinar una baja residualidad de la práctica de descompactación. De los resultados obtenidos, surge la importancia de practicar una estrategia preventiva de la recompactación luego del pasaje del implemento, para extender la residualidad de la práctica. Entre ellos, cabe mencionar evitar

el tránsito con baja capacidad portante del suelo, el control de tránsito (minimizar el área transitada) y la consolidación de estructura a partir del enredado de raíces.

## ■ REGENERACIÓN BIOLÓGICA

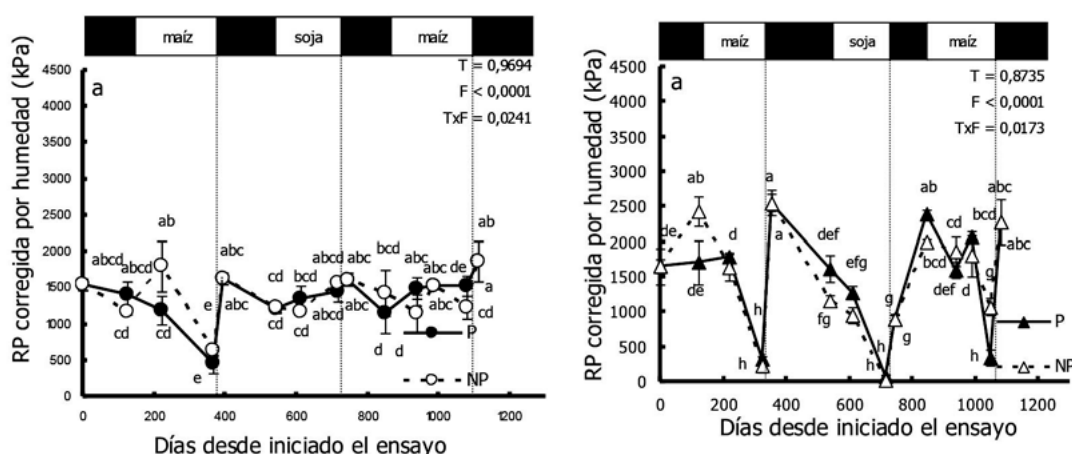
La presencia de raíces vivas, el aporte de rastrojos y la actividad biológica asociada a ellos resultan fundamentales para la formación y estabilización de los agregados del suelo. Resultados presentados (Álvarez *et al.*, 2012b; Fernández *et al.*, 2012) en cortes delgados muestran que la presencia de raíces en forma continua durante todo el año, como son las pasturas o un mayor número de cultivos por año aumenta la proporción de agregados con formas más redondeadas. Ello resalta, la importancia del enredado por raíces en suelos limosos con arcillas poco expansibles como mecanismo de formación de agregados y la actividad biológica como generadores macroporos. Sin embargo, este tipo de mecanismo de agregación no persiste en el tiempo, por lo que se sugiere como práctica agronómica maximizar la presencia de raíces vivas en estos sistemas productivos. Taboada *et al.* (2004) realizaron un experimento en condiciones controladas tomando suelos con distinta historia de uso (pastura, agricultura con labranza convencional, y agricultura con labranza convencional pero con erosión). Allí observaron que la regeneración de la estructura era promovida por la acción conjunta de raíces vivas (raygrass) y los ciclos de humedecimiento-secado. Los ciclos de humedecimiento y secado sin raíces disminuían la estabilidad. Por otro lado, la historia previa no fue relevante en la regeneración y estabilidad de la estructura. Los cambios en la agregación ocurrieron en 4 meses sugiriendo que la regeneración de la estructura puede lograrse en cortos períodos.

## ■ EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS EN EL TIEMPO

Fernandez *et al.* (2015) evaluaron la dinámica de la densidad aparente del suelo y la resistencia a la penetración, entre otras variables, a lo largo de 4 años durante el barbecho invernal y cultivos de verano en situaciones bajo pastoreo invernal de residuos y clausuras a ese pastoreo invernal. En el caso del pastoreo la carga aplicada fue de (1,1 vaca/ha). Los momentos evaluados fueron: a la siembra del cultivo (luego del barbecho, pastoreado o no) que permite evaluar el efecto del pisoteo), al finalizar el cultivo que permite evaluar la acción de las raíces, y luego de la cosecha que permite evaluar el efecto de la cosechadora. Esto se realizó en dos suelos del sur de Santa Fe, un Argiudol y un Hapludol Típicos. En la **Figura 14**  se presenta, a modo de ejemplo, la dinámica de la resistencia a la penetración corregida por la humedad medida.

Los resultados hallados muestran que el pastoreo del rastrojo durante el barbecho invernal no generó aumentos de la densidad aparente superficial, pero sí endurecimiento del suelo y un aumento de la inestabilidad estructural (Fernández *et al.*, 2015). En general, se encontró un comportamiento errático en las respuestas de las variables luego del pastoreo invernal; no existiendo un patrón de variación en el tratamiento pastoreado. Este análisis demostró que no hubo degradación de la condición física como consecuencia del pisoteo, ni tampoco proceso de regeneración del suelo en el tratamiento no pastoreado durante el invierno a lo largo del ensayo. Probablemente, esta ausencia de efectos está relacionada con la escasez de precipitaciones invernales, a lo que se suma una buena condición de piso generada por la siembra directa.





**Figura 14:** Resistencia a la penetración corregida por el contenido hídrico del suelo (RP corregida humedad) en función de los días desde iniciado el ensayo para los tratamientos P y NP en el suelo Hapludol Típico; para los estratos 0-0,05 m para un Argiudol Típico (a), y un Hapludol Típico (b). T: p-value del tratamiento, F: p-value de la fecha, TxF: p-value de la interacción “tratamiento x fecha”. Letras distintas indican diferencias significativas de la interacción o de los factores cuando el  $P < 0,05$ .

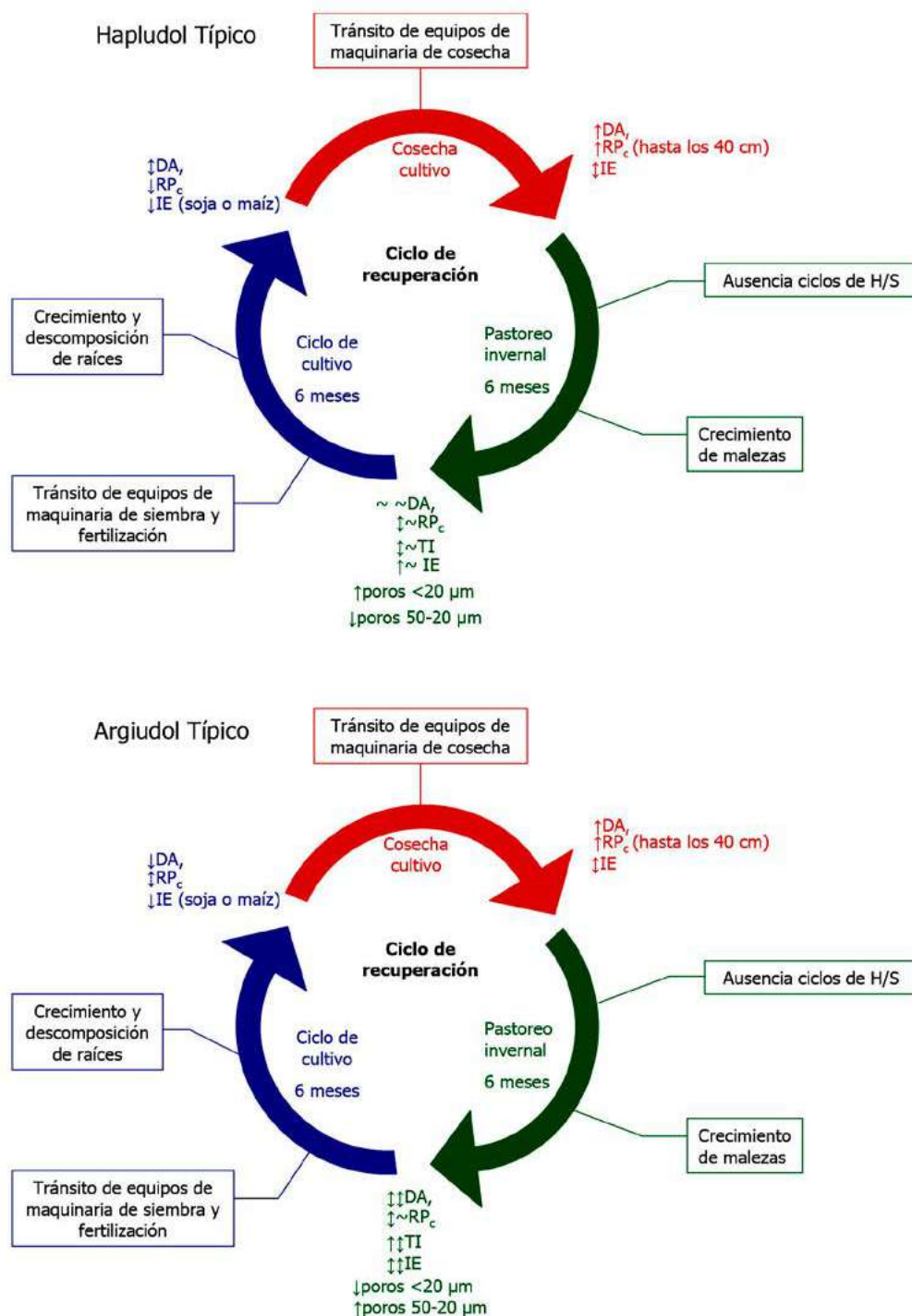
**Figure 14:** Penetration resistance corrected by soil water content (RP corregida por humedad) variation with time for the 0-5 cm layer Typic Argiudoll (a); and, Typic Hapludoll (b). Black boxes indicate the grazing periods, white boxes indicate the cropping periods, and dotted lines indicate harvest operation. Ungrazed (UN) and grazed (G) treatments were analyzed as repeated measures over time. T: p-value of the treatment, F: p-value of the date, TxF: p-value of the interaction “treatment by date”. Different letters indicate significant differences in interaction or factors when  $P < 0.05$ .

La cosecha del cultivo fue el mayor impacto para las propiedades físicas del suelo, particularmente cuando se llevó a cabo con el suelo húmedo, aumentando la densidad aparente y la DA. Sólo las operaciones de cosecha produjeron daños en los suelos.

Las propiedades físicas mejoraron durante el crecimiento del cultivo, tanto con maíz como soja, y colaboró en la recuperación del deterioro físico provocado por la operación de cosecha. Durante los ciclos de cultivo, los efectos fueron positivos en relación con la respuesta de la RP corregida por el CH medio y en algunos casos en la DA. En los dos suelos, seguramente la presencia de raíces vivas fue responsable de esta regeneración física.

Se propone un modelo conceptual, en el cual se señalan los cambios más importantes que surgen consecuencia de las secuencias de actividades realizadas en el sistema integrado agrícola-ganadero **Figura 15** . El pastoreo invernal de residuos de cosecha se considera como el punto de partida de este modelo conceptual. Al finalizar el pastoreo, las propiedades físicas no muestran un impacto como consecuencia del mismo. El episodio más frecuente en la región bajo estudio son las bajas precipitaciones invernales. Esto conllevaría a una condición de suelo con alta capacidad portante. Sumado a ello, los sistemas de SD presentan mayor contenido de MO en el estrato superficial. Por consiguiente, estas condiciones conducen a la ausencia de un efecto perjudicial del tránsito del ganado. Por otro lado, durante este período son bajas las posibilidades del desarrollo de ciclos de humedecimiento – secado como proceso de recuperación abiótica. No obstante ello, las variables físicas pudieron experimentar mejoras al finalizar la etapa de pastoreo.

En referencia a la secuencia de cultivos, la evaluación de las variables físicas al final de los ciclos de cada uno, en los diferentes años mostró siempre resultados promisorios. Esto hace concluir que la presencia de raíces vivas contribuye fuertemente, en estos suelos, a los mecanismos involucrados en la regeneración estructural (“binding”).



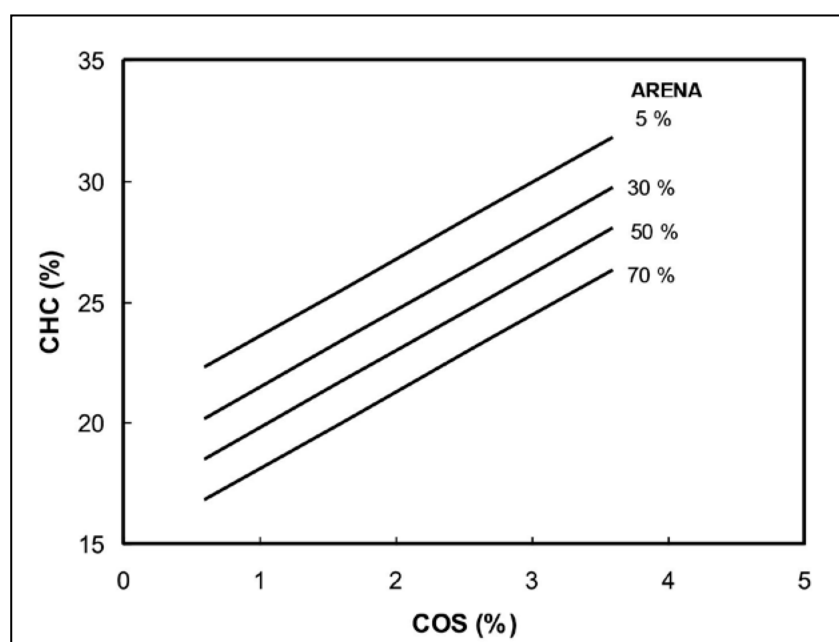
**Figura 15:** Ciclo de recuperación: pastoreo invernal, ciclo del cultivo, cosecha del cultivo para el Hapludol Típico y Argiudol Típico. Tendencias de las variables (símbolos:  $\sim$   $\downarrow$   $\uparrow$   $\downarrow$ ) como consecuencia de cada ciclo. Luego del pastoreo invernal el segundo símbolo es el tratamiento P respecto del NP.  $\sim$ : similar;  $\downarrow$ : disminuye;  $\uparrow$ : aumenta;  $\downarrow$ : aumenta/disminuye (errático) (Fernández, 2011). DA: densidad aparente, RP: resistencia a la penetración, TI: tasa de infiltración, IE: inestabilidad estructural.

**Figure 15:** Recovery cycle: winter grazing, crop cycle, crop harvest for Typical Hapludoll and Typical Argiudoll. Trends of the variables (symbols:  $\sim$   $\downarrow$   $\uparrow$   $\downarrow$ ) as a consequence of each cycle. After winter grazing the second symbol is the treatment P with respect to NP.  $\sim$ : Similar;  $\downarrow$ : decreases;  $\uparrow$ : increases;  $\downarrow$ : increase / decrease (erratic) (Fernández, 2011). DA: bulk density, RP: penetration resistance, TI: infiltration rate, IE: structural instability.

La cosecha del cultivo, es una operación ineludible en cualquiera de los sistemas que incluya a la agricultura extensiva. Debido a la magnitud de su impacto, es que se considera tan relevante como para formar la tercera fase de este modelo. La presencia del tránsito de maquinarias conduce a un impacto negativo sobre las propiedades físicas. Este efecto, probablemente, tiene lugar debido a dos factores. Uno de ellos, es el peso total de la maquinaria (cosechadora, carrito, tractor); y el segundo agente, es la baja capacidad de soporte del suelo en el momento de la operación. Este último se debe a que ese momento puede coincidir con un escenario meteorológico caracterizado por altas precipitaciones otoñales, lo cual aumenta la susceptibilidad del suelo a compactación.

## ■ PREVENCIÓN

La compactación del suelo puede ser minimizada si se reduce la fuerza aplicada por el tránsito, o bien se aumenta la resistencia del suelo para soportar las cargas aplicadas- capacidad portante y susceptibilidad a la compactación-. La capacidad portante del suelo depende del contenido hídrico del mismo. El riesgo de compactación de un suelo puede ser predicho a través del test de compactabilidad de Proctor que se realiza en laboratorio (ASTM, 1982). Este procedimiento estandarizado de ingeniería de suelos determina los cambios de la densidad aparente del suelo en función de su contenido de humedad en respuesta a la aplicación de una energía y procedimiento de compactación estandarizados. Los principales parámetros derivados del test de Proctor son la densidad aparente máxima (DMAX) y el contenido hídrico crítico (CHC). La DMAX se alcanza a un contenido específico de humedad del suelo llamado CHC. Resulta de interés conocer este último, ya que debe evitarse transitar en esa condición ya que se provoca la mayor compactación del suelo. La realización de este Test es complicada y por lo tanto, resulta interesante poder determinar el mismo a partir de propiedades del suelo fáciles de medir (textura, materia orgánica, etc.). En la **Figura 16** se presentan los distintos valores de CHC de suelos con distintos contenidos de carbono orgánico y arena a modo de que los productores y técnicos puedan de manera rápida conocer el valor del CHC de sus suelos, y operar considerando el mismo. Los mismos fueron obtenidos de una compilación de mediciones realizadas en la región (Álvarez *et al.*, 2010).



**Figura 16:** Variación del contenido de humedad crítico (CHC) con el carbono orgánico del suelo (COS) y el contenido de arena según modelo presentado en Álvarez (2013).

**Figure 16:** Variation of critical moisture content (CHC) with soil organic carbon (COS) and sand content according to the model presented in Álvarez (2013).



Por otro lado, se puede manejar el estrés aplicado minimizando el tránsito (por ejemplo descargando en cabecera o calles durante la cosecha), manejando el peso de la maquinaria, o el área de contacto con el suelo (neumáticos y presión de inflado).

Finalmente se recomienda para el manejo de la calidad física de los suelos en siembra directa:

- Monitorear la evolución de la resistencia a la penetración y la infiltración en planteos de siembra directa continua.
- Propiciar la presencia de raíces vivas que aseguren la agregación por enredado o entramado radical, el cual parece ser un mecanismo de importancia para la buena estructuración de suelos limosos con arcillas no expandibles. Surge de los resultados presentados que el suelo debería contar con raíces vivas a lo largo del mayor tiempo posible según la región (cultivos de cobertura, doble cultivo).
- Aplicar prácticas tendientes a aumentar o mantener el contenido de materia orgánica del suelo, las cuales son las mismas que asegurarían maximizar la agregación por enredado.
- Aplicar medidas preventivas de la compactación como el control del tránsito agrícola y transitar con buena capacidad soporte del suelo (altos contenidos de materia orgánica, no transitar el suelo cerca del contenido hídrico crítico).
- Aplicar medidas correctivas como la descompactación pero asegurar su persistencia con un buen manejo pos-práctica aplicando todas las medidas preventivas posibles descriptas en el ítem anterior.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez, CR & MA Taboada. 2008. Capítulo 6. Indicadores de la fertilidad física del suelo. En: MA Taboada, CR Álvarez (eds.). Condición física del suelo y su relación con la fertilidad. Editorial Facultad de Agronomía UBA. Buenos Aires.
- Alvarez, CR, MATaboada, S Perelman & H Morrás. 2014. Topsoil structure in no-tilled silty loam soils in the Rolling Pampas, Argentina. *Soil Res* 52: 533-542.
- Alvarez, CR. 2013. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa: Caracterización génesis y manejo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 10: 2-9.
- Alvarez, CR; FG Micucci; C Bustingorri & MA Taboada. 2010. Prediction of Proctor test parameters in the Pampas region of Argentina. *Revista Brasileira do Ciencia do Solo* 34:1787-1793.
- Alvarez, CR; MA Taboada; FH Gutiérrez Boem; A Bono; PL Fernández & 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.
- Alvarez, CR; PL Fernández & MA Taboada. 2012a. Relación de la inestabilidad estructural con el manejo y propiedades de los suelos en la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 30: 173-178.
- Alvarez, R & HS Steinbach. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil Till Res* 104: 1-15.
- Andriulo, A & G Cordone. 1998. Impacto de labranzas y rotaciones sobre la materia orgánica de los suelos de la región pampeana húmeda. 65-96. En: Siembra Directa. Editores: Panigatti JL, Marelli H, Buschiazzi, D, Gil R.
- Bathke, GR & GR Blake. 1984. Effects of soybeans on soil properties related to soil erodability. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 48: 1398-1401.
- Beutler, NA & JF Centurion. 2004. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 39: 581-588.

- Bolliger, A; J Magid; TJ Carneiro Amado; F Skóra Neto; M de F Dos Santos Ribeiro; A Calegari; R Ralisch & A De Neergaard. 2006. Taking stock of the Brazilian "zero-till revolution": a review of landmark research and farmers' practice. *Adv Agron.* 91: 47-109.
- Botta, GF; D Joraujuria; R Balbuena; M Ressia; C Ferrero; H Rossato & M Tourn. 2006. Deep tillage and traffic effects on subsoil compaction and sunflower (*Helianthus annuus* L.) yields. *Soil Till. Res.* 91: 164-172.
- Cappannini, D, Dominguez O (1961) Los principales ambientes geoedafológicos de la Provincia de Buenos Aires. IDIA 163:33-39
- Carter, MR. 1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci* 70: 425 – 433.
- Chanasyk D & A Naeth. 1995. Grazing impacts on bulk density and soil strength in the foothills fescue grasslands of Alberta, Canada. *Can. J. Soil Sci.* 75: 551-557.
- Correa, JC & K Reichardt. 1995. Efeito do tempo de uso das pastagens sobre as propriedades de um Latosolo Amarelo da Amazonia Central. *Pesq. Agropec. Bras.* 30: 107-114.
- Cosentino, D & F Kraemer. 2017. Fertilidad física, evaluación y manejo. En: Manejo y conservación de suelos con especial énfasis en situaciones argentina. Ed Vázquez M. AACs. Bs As
- Cosentino, DJ & C Pecorari. 2002. Limos de baja densidad: impacto sobre el comportamiento físico de los suelos de la región pampeana. *Ciencia del Suelo* 20: 9-16.
- da Silva, AP; S Imhoff & M Corsi. 2003. Evaluation of soil compactions in an irrigated short-duration grazing system. *Soil Till. Res.* 70: 83-90.
- Dardanelli, JL; MA Calmon; JW Jones; MP Andriani; MP Díaz & DJ Collino. 2003. Use of a crop model to evaluate soil impedance and root clumping effects on soil water extraction in three argentine soils. *Trans. ASAE* 46: 1265-1275.
- Dexter, AR. 1988. Advances in the characterization of soil structure. *Soil Till Res* 11: 199-238.
- Díaz Zorita, M; E Perfect & JE Grove. 2002. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil Till Res* 64: 3-22.
- Díaz Zorita, M; JE Grove & E Perfect. 2007. Sieving duration and sieve loading impacts on dry soil fragment size distributions. *Soil Till Res* 94: 15-20.
- Durán, A, H Morrás, G Studdert & LIU Xiaobingl 2011. Distribution, Properties, Land Use and Management of Mollisols in South America Chin. Geogra. Sci. 21: 511-530.
- Fernández, PL. 2011. Integración de la cría bovina en sistemas de agricultura en siembra directa: ¿cómo cambian las propiedades físicas? Tesis doctoral. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. 153 p.
- Fernández, PL; CR Álvarez & MA Taboada. 2011. Assessment of topsoil properties in integrated crop-livestock and continuous cropping systems under Zero Tillage (ZT). *Aust. J. Soil Res.* 49: 143-151.
- Fernández, PL; CR Alvarez & MA Taboada. 2015. Topsoil compaction and recovery in integrated no-tilled crop-livestock systems of Argentina *Soil Till Res* 153: 86-94.
- Franzluebbers, AJ & JA Stuedemann. 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil Till Res* 100: 141-153.
- Franzluebbers, AJ & RF Follett. 2005 Greenhouse gas contributions and mitigation potential in agricultural regions of North America: Introduction. *Soil Till Res* 83: 1-8.
- García-Prechác, F; O Ernst Benech; G Siri-Prieto & JA Terra. 2004. Integrating no-till into crop-pasture rotations in Uruguay. *Soil Till Res* 77: 1-13.
- Gentile, RM; DL Martino & MH Entz. 2005. Influence of perennial forages on subsoil organic carbon in a long term rotation study in Uruguay. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105: 419-423.
- Gijsman, AJ & RJ Thomas. 1996. Evaluation of some physical properties of an Oxisol after conversion of native Savanna into legume-based on pure grass pastures. *Trop. Grassland* 30: 237-248.
- Glinski, J & J Lipiec. 1990. Soil Physical Conditions and Plant Roots. CRC Press Inc, Boca Raton, Florida. 250 pp.
- Greenwood, KL; DA MacLeod; JM Scott & KJ Hutchinson. 1997. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. *Aust. J. Exp. Agr.* 37: 413-419.
- Gupta SC & RR Allmaras. 1987. Models to assess the susceptibility of soils to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.* 6: 65-100.

- Hamza, MA & WK Anderson. 2005. Improving soil physical fertility and crop yield on a clay soil in western Australia. *Aust. J. Soil Res.* 53: 615-620.
- Holt, JA, KL Bristol & JG Mclvor. 1996. The effects of grazing pressure on soil animals and hydraulic properties of two soils in semi-arid tropical Queensland. *Aust. J. Soil Res.* 34: 69-79.
- Horn, R; T Way & J Rostek. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil Till. Res.* 73: 101-106.
- Hubert, F; V Hallaire; P Sardini; L Caner & D Heddadj. 2007. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. *Geoderma* 142: 226-236.
- Kay, BD; Grant CD & PH Groenevelt. 1985. Significance of ground freezing on soil bulk density under zero tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:973-978.
- Lal, R; DC Reicosky & JD Hanson. 2007. Editorial: Evolution of the plow over 10,000 years and the rationale for no-till farming. *Soil Till. Res.* 93: 1-12.
- Mapfumo, E; DS Chanasyk & M.A. Naeth, VS Baron. 1999. Soil compaction under grazing of annual and perennial forages. *Can. J. Soil Sci.* 79: 191-199.
- Martens, DA; W Emmerich; JET McLain & TN Johnsen. 2005. Atmospheric carbon mitigation potential of agricultural management in the southwestern USA. *Soil Till Res* 83: 95-119.
- Martinez, LJ & JA Zinck. 2004. Temporal variation of soil compaction and deterioration of soil quality in pasture areas of Colombian Amazonia. *Soil Till Res* 75: 3-17.
- McCalla, GR; WH Blackburn & LB Merrill. 1984. Effects of livestock grazing on infiltration rates, Edwards Plateau of Texas. *J. Range Manage.* 37: 265-269.
- Micucci, FG & 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.
- Miglierina, AM; JO Iglesias; MR Landriscini; JA Galantini & RA Rosell. 2000. The effects of crops rotation and fertilization on wheat productivity in the Pampean semiarid region of Argentina. 1. Soil physical and chemical properties. *Soil Till Res* 53: 129-135.
- Morrás, H & G Cruzate. 2000. Textural classification and spatial distribution of the parent material of the soils of the northern Pampa. In: Proceedings of the XVII Argentinean Congress on Soil Science. Mar del Plata, Argentina.
- Morrás, HJM & Moretti L. 2016. A New Soil-Landscape Approach to the Genesis and Distribution of Typic and Vertic Argiudolls in the Rolling Pampa of Argentina. In: © Springer International Publishing Switzerland 2016. J.A. Zinck *et al.* (eds.), *Geopedology: An Integration of Geomorphology and Pedology for Soil and Landscape Studies*, DOI 10.1007/978-3-319-19159-1\_11
- Oades, JM. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma* 56: 377-400.
- Paruelo, JM, JP Guerschman & SR Verón. 2005. Expansión agrícola y cambios en el uso del suelo. *Ciencia Hoy*.14-23
- Pecorari, C, J Guerif & P Stengel. 1990. Fitolitos en los suelos pampeanos argentinos: influencia sobre las propiedades físicas determinantes de los mecanismos elementales de la evolución de la estructura. *Ci. Suelo (Argentina)*. 8: 135-141
- Pereyra, F. 2003 Ecoregiones de la Argentina, vol 37. Anales SEGEMAR, Buenos Aires, p 191.
- Quiroga, AR; DE Buschiazzo & N Peinemann. 1996. Soil organic matter particle size fraction in soils of the semiarid Argentinian pampas. *Soil Sci.* 61: 104-108.
- Rodd, AV; YA Papadoulous; LF Laflamme; KB McRae; SAE Fillmore & RW Wilson. 1999. Effect of rotational grazing on selected physical properties of a clayed Brunisolic Gray Luvisol loam in Nova Scotia. *Can. J. Soil Sci.* 79: 117-125.
- Sadras, VO; GJ O'Leary & DK Roget. 2005. Crop responses to compacted soil: capture and efficiency in the use of water and radiation. *Field Crops Res.* 91: 131-148.
- Salazar Lea Plaza, JC & G Moscatelli. 1989. Mapa de Suelos de la Provincia de Buenos Aires. Scala: 1:500000. SAGyP - INTA, 527 p. Buenos Aires.
- Sanford, JO. 1982. Straw and tillage management practices in soybean-wheat double cropping. *Agron. J.* 74:1032-1035

- Sasal, MC; AE Andriulo & MA Taboada. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinean Pampas. *Soil Till. Res.* 87: 9-18.
- Senigaglia, C & M Ferrari. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. En: D.R. Buxton, R. Shibles, R.A. Forsberg, B.L. Blad, K.H. Asay, G.M. Paulsen y R.F. Wilson (Eds). *International crop Science I. Crop Science Society of America, Madison, Wisconsin, USA.* 27-35.
- Siri-Prieto, G & O Ernst. 2010. Manejo Del suelo y rotación con pasturas: efecto sobre la calidad del suelo, el rendimiento de los cultivos y el uso de insumos. *Informaciones Agronómicas* 45: 22-26.
- Slowińska-Jurkiewicz, A & H Domżał. 1991. The structure of the cultivated horizon of soil compacted by wheels of agricultural tractors. *Soil Till. Res.* 19: 215-226.
- Smith, CW; MA Johnston & S Lorentz. 1997. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactability and pressibility. *Soil Till. Res.* 43, 335-354.
- Soriano, A. 1991 Río de la Plata grasslands. Natural grassland. *Ecosystems of the world.* 367-407. (Elsevier: Amsterdam).
- Steinbach, HS & R Álvarez. 2006. Changes in soil organic carbon contents and nitrous oxide emissions after introduction of no-till in pampean agroecosystems. *J. Environ. Qual* 35: 3-13.
- Strudley, MW; TR Green & JC Ascough II. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: state of the science. *Soil Tillage Res.* 99: 4-48.
- Studdert, GA; HE Echeverría & EM Casanovas. 1997. Crop-pasture rotation for sustaining the quality and productivity of a Typic Argiudoll. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 1466-1472.
- Taboada, MA; OA Barbosa & DJ Cosentino. 2008. Null creation of air-filled structural pores by soil cracking and shrinkage in silty loam soils. *Soil Sci.* 173: 130-142.
- Taboada, MA; OA Barbosa, MB Rodríguez & DJ Cosentino. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- Taddese, G; MAM Saleem & W Ayalneh. 2002. Effect of livestock grazing on physical properties of a cracking and self-mulching Vertisol. *Aust. J. Exp. Agric.* 42: 129-133.
- Tisdall, JM & JM Oades. 1982. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33: 141-163.
- Twerdoff, DA; DS Chanasyk; E Mapfumo; MA Naeth & VS Baron. 1999. Impacts of forage grazing and cultivation on near-surface relative compaction. *Can. J. Soil. Sci.* 79: 465-471.
- Viglizzo, E.F. 1986. Agroecosystems stability in the Argentine pampas. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 16: 1-12.
- Viglizzo, EF, LV Carreño, H Pereyra, F Ricard, J Clatt & D Pincén. 2010. Dinámica de la frontera agropecuaria y cambio tecnológico. En: *Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su impacto ecológico-ambiental.* Eds: Viglizzo, EF, J Jobbágy. Editorial INTA. 102 p.
- Willatt ST & DM Pullar. 1983 Changes in soil physical properties under grazed pastures. *Aust. J. Soil Res.* 22: 343-348.
- Wischmeier, W.H., C.B. Johnson & B.V. Cross. 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. *J. Soil Water Conserv.* 26: 189-193.
- Zárate, M & A Tripaldi. 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Research* 3: 401-417.
- Zárate, M. 2003. Loess of southern South America. *Quaternary Science Reviews* 22: 1987-2006.