

## Manejo del Suelo

Guillermo Gerster y Silvina Bacigaluppo

Los suelos de la región pampeana fueron afectados durante décadas por problemas erosivos y de degradación física, debido a su naturaleza y al sistema de producción utilizado. En los suelos predominantes del área, el alto contenido de limo, arcillas no expansivas y la disminución de los niveles de materia orgánica, generan un creciente deterioro de su estructura que se manifiesta a través de una alta susceptibilidad a la formación de costras superficiales y de la aparición de horizontes sub-superficiales endurecidos (Pilatti *et al.*, 1988). Este proceso creciente de degradación de las propiedades físicas, químicas y biológicas, se manifiesta en un menor aprovechamiento del agua, en graves daños de erosión e inestabilidad de los rendimientos (Marelli, 1998; Orellana, 1993).

A partir de 1990, la práctica de siembra directa creció a un ritmo acelerado en nuestro país superando en la campaña 2008/09 las 24 millones de has (Precop2, 2011). Si bien la difusión masiva de esta técnica contribuye a reducir los riesgos de erosión y degradación superficial por efectos de las lluvias, las razones de su notable expansión están asociadas a su menor costo, mayor practicidad, a la disponibilidad de equipos de siembra y fundamentalmente a la introducción de cultivares genéticamente modificados resistentes a glifosato. El crecimiento sostenido de esta práctica se realizó sin una adecuada rotación de cultivos: en la actualidad la superficie cubierta con gramíneas de verano alcanza sólo un 18 % del área (SIIA, 2012).

Para alcanzar rendimientos estables del cultivo en el tiempo o bien incrementarlos, es necesario analizar cuáles son los principales factores que contribuyen a determinar el rendimiento final del mismo. Conocer la influencia de estos factores y realizar un manejo adecuado de los mismos, permitirían generar un ambiente de alta producción y hacer sostenible el cultivo de soja en nuestro país.

### Factores edáficos y prácticas culturales asociados al rendimiento del cultivo.

En el área pampeana central, uno de los primeros trabajos desarrollados con el objeto de explorar la existencia de asociaciones entre el rendimiento de soja, las prácticas culturales y variables físicas y químicas del suelo, se realizó utilizando información de sistemas reales de producción del sur de Santa Fe. Durante las campañas 97/98 al 01/02, se seleccionaron lotes representativos del área, donde la soja fue el cultivo principal, que presentaron un amplio rango de rendimientos (Gerster *et al.*, 2002).

Los resultados obtenidos se analizaron mediante un modelo factorial de correspondencias múltiples. En el Cuadro I se presentan las variables incluidas en el análisis y las categorías establecidas.

Cuadro I. Variables y categorías incluidas en el análisis multivariado.

Variables	Categorías		
	1	2	3
Rendimiento. Promedio 5 años (t.ha <sup>-1</sup> )	≤ 2,4	2,41-2,99	≥ 3,0
Pendiente media (%)	0 a 0,5	0,5 -1	> 1
Años de agricultura continua	≤ 10	> 10	-
MO-Horizonte A (%)	< 2,20	2,20 - 2,99	≥ 3
Densidad aparente Horizonte A (t m <sup>-3</sup> )	≤ 1.23	> 1.23	-
Piso subsuperficial (%)	≤ 10	10,01-59,99	≥ 60
Estado Masivo Δ (bloques de suelo sin porosidad visible (%))	< 25	≥ 25	-
Frecuencia de maíz en la rotación. Años (%)	0	1-25	> 25
Tipo de producción de la empresa	Agrícola puro	Agr.-ganadero	-
MO: materia orgánica.			

En la Figura 1 se presentan las relaciones entre las variables finalmente consideradas.

El análisis multivariado utilizado, permitió determinar las asociaciones entre las variables en estudio y su comportamiento. El rendimiento estuvo más asociado con las variables físicas dependientes de la acción antrópica, que con el resto de las variables. Solo los bajos valores de MO se asociaron fuertemente a menores rendimientos. Para reducir la brecha entre altos y bajos rendimientos, se deberían utilizar prácticas de manejo que eviten la formación de sectores compactos subsuperficiales y/o eventualmente, aplicar prácticas agronómicas que reduzcan su presencia.

Un trabajo posterior (Bacigaluppo et al., 2011) se realizó con el objetivo de identificar variables edáficas sencillas de ser medidas a campo, que combinadas con variables climáticas, contribuyan a explicar la mayor parte de las variaciones de rendimiento de soja bajo sistemas de siembra directa en Argiudoles del Sur de Santa Fe.

Se realizó un estudio a partir de datos recopilados en lotes de productores (sitios), con diferentes historias de manejo, destinados a soja en seco en distintas localidades del sur de la provincia de Santa Fe, para cuatro campañas agrícolas (2001/02 a 2004/05). Los suelos de los lotes evaluados pertenecieron todos al Gran grupo Argiudol, sólo

variaron a nivel de series. En estos Argiudoles, la capacidad máxima de almacenaje de agua disponible (agua útil) para las plantas hasta los dos metros de profundidad, es de aproximadamente 300 mm (Andriani, 2000).

Las variables registradas de suelo y clima fueron utilizadas en la construcción de modelos estadísticos capaces de explicar la variabilidad observada en los rendimientos dentro de la región, analizando previamente correlaciones entre dichas variables.

A través de los ambientes evaluados, el rendimiento del cultivo osciló entre 2060 y 4580 kg ha<sup>-1</sup>. En el Cuadro 2 se observan los rangos de las variables edáficas y climáticas medidas.

Se realizó un análisis de componentes principales que involucró variables de suelo y rendimiento, el cual explicó el 62% de la variación total (Figura 2). Se observó una asociación negativa del rendimiento con el porcentaje de estados masivos delta y con el porcentaje de pisos compactados. Hubo además, una correlación positiva del rendimiento respecto a la conductividad hidráulica (infiltración básica) y al contenido de agua útil inicial (mayores valores de conductividad hidráulica y agua útil inicial se asociaron con mayores rindes). Esta Figura también pone en evidencia la alta correlación negativa de conductividad hidráulica con estados masivos y presencia de pisos.

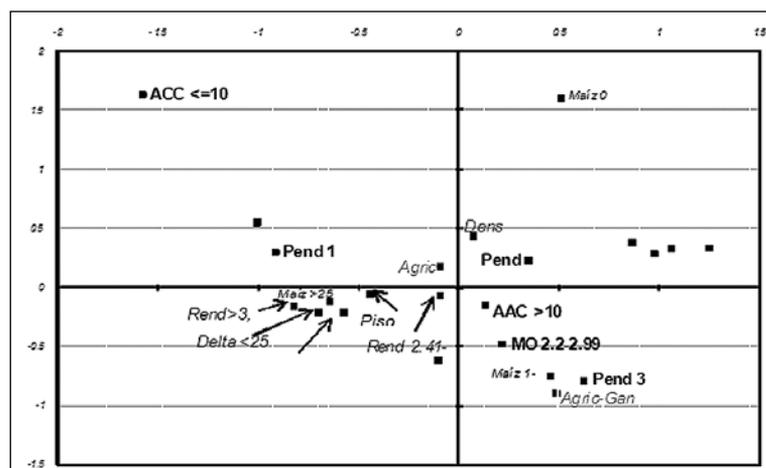


Figura 1: Relaciones entre las variables analizadas

Pend = pendiente; MO = materia orgánica en Horizonte A (%); Dens = densidad aparente en Horizonte A (t. m<sup>3</sup>); AAC = años de agricultura continua; Maiz = frecuencia de maíz en la rotación de cultivos; Agric = actividad agrícola pura; Agric-Gan = actividad agrícola ganadera porcina o vacuna; Piso = compactaciones horizontales subsuperficiales (%); Rend = rendimientos promedio de soja de primera en 5 años (t.ha<sup>-1</sup>).

Cuadro 2. Variables edáficas y climáticas registradas en ambientes de soja del sur de Santa Fe.

Variables	Abreviatura	Unidad	Promedio	Mínimo – Máximo
Agua útil inicial *	AUI	mm	256	127 - 380
Materia orgánica	MO	%	3.03	2.23 - 3.55
Profundidad al horizonte B2t	PrB2t	cm	25	14 – 34
Estados masivos delta	Md	%	21	0 – 57
Pisos compactados	Pi	%	54	0 – 93
Conductividad hidráulica saturada.	Ksat	cm seg <sup>-1</sup>	$67 \times 10^{-5}$	$26 \times 10^{-5}$ - $15 \times 10^{-4}$
Radiación solar acumulada entre E-R2	Rs <sub>1</sub>	MJ m <sup>-2</sup>	1065	655 - 1493
Radiación solar acumulada entre R2-R5	Rs <sub>2</sub>	MJ m <sup>-2</sup>	831	549 - 1183
Radiación solar acumulada entre R5-R7	Rs <sub>3</sub>	MJ m <sup>-2</sup>	779	570 - 1362
Temperatura media diaria E-R2	Tm <sub>1</sub>	°C	23.3	20.3 - 25.6
Temperatura media diaria R2-R5	Tm <sub>2</sub>	°C	24.6	22.9 - 26.3
Temperatura media diaria R5-R7	Tm <sub>3</sub>	°C	23.4	20.2 - 25.9
Precipitaciones acumuladas E-R2	Pp <sub>1</sub>	mm	220	60 - 421
Precipitaciones acumuladas R2-R5	Pp <sub>2</sub>	mm	130	8 – 253
Precipitaciones acumuladas R5-R7	Pp <sub>3</sub>	mm	177	9 – 412
Precipitaciones acumuladas R2-R7	pp <sub>2+3</sub>	mm	307	107 - 532
Precipitaciones acumuladas E-R7	pp <sub>1+2+3</sub>	mm	527	264 - 831

E: emergencia; R2: plena floración; R5: inicio llenado de grano; R7: madurez fisiológica.

\*perfil 0-200 cm

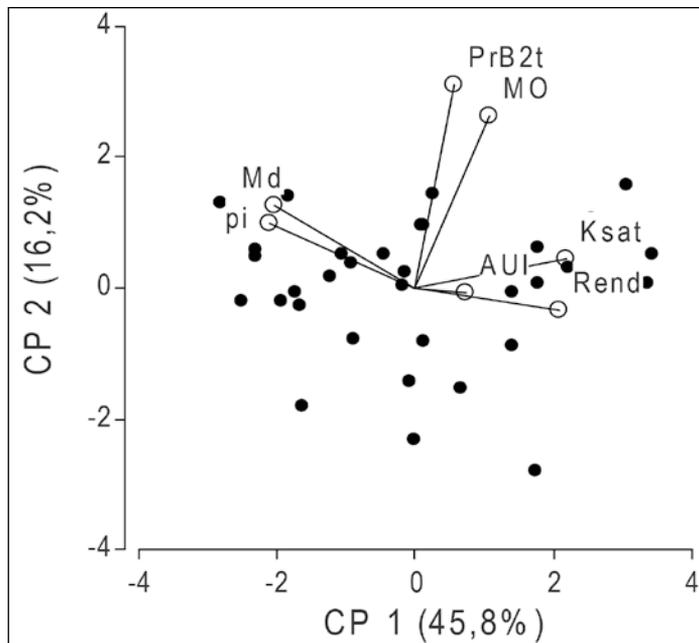


Figura 2. Biplot del análisis de componentes principales de variables de suelo y rendimiento (círculos vacíos) en ambientes de cultivo de soja (círculos llenos) en el Sur de Santa Fe. Rend: rendimiento; AUI: agua útil inicial; Ksat: conductividad hidráulica saturada; MO: materia orgánica; PrB2t: profundidad al horizonte B2t; Md: estados masivos delta; pi: pisos compactados.

A partir de los resultados observados, se ajustaron modelos de regresión de los que surgieron valores umbrales para dos de las variables estudiadas: I) 180 mm de precipitaciones acumuladas en R2-R7 y II) 200 mm de agua útil inicial del suelo. Estos valores umbrales, separaron diferentes situaciones entre los ambientes evaluados:

**Ia) Ambientes con precipitaciones acumuladas en R2-R7  $\leq$  180 mm**

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,88$ ) incluyó sólo dos variables explicativas: las precipitaciones acumuladas en R2-R7 ( $pp_{2+3}$ ) y el porcentaje de estados masivos delta ( $M\Delta$ ).

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = 892 - (14 \times M\Delta) + (19 \times pp_{2+3})$$

Error= 285 kg ha<sup>-1</sup>

El modelo ajustado, indica que ambientes con mayores precipitaciones en el período reproductivo y con menor presencia de bloques masivos delta, fueron los que produjeron los mayores rendimientos.

**Ib) Ambientes con precipitaciones acumuladas en R2-R7  $>$  180 mm**

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,48$ ) incluyó como variables predictoras a Temperatura media de R2-R5 ( $Tm_2$ ), radiación solar de R5-R7 ( $Rs_3$ ), contenido de materia orgánica en el horizonte A (MO) y porcentaje de estados masivos delta ( $M\Delta$ ).

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = -4320 + (435 \times MO) - (21 \times M\Delta) + (244 \times Tm_2) + (1,03 \times Rs_3)$$

Error= 453 kg ha<sup>-1</sup>

Ambientes con mayor  $Tm_2$ ,  $Rs_3$  y MO y menor  $M\Delta$  fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando las lluvias en el periodo reproductivo fueron mayores a 180 mm.

**Ia) Ambientes con agua útil inicial  $\leq$  200 mm**

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,72$ ) incluyó sólo conductividad hidráulica saturada (Ksat).

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = 2003 + (2331982 \times Ksat)$$

Error= 378 kg ha<sup>-1</sup>

Los ambientes con mayor Ksat fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando iniciaron el ciclo del cultivo con baja reserva de agua útil en su perfil de suelo.

**IIb) Ambientes con agua útil inicial  $>$  200 mm**

Para estos ambientes el mejor modelo de regresión obtenido ( $R^2 = 0,51$ ) incluyó las variables temperatura media de R2-R5 ( $Tm_2$ ), radiación solar de R5-R7 ( $Rs_3$ ), contenido de materia orgánica en el horizonte A (MO) y porcentaje de estados masivos delta ( $M\Delta$ ).

$$\text{Rendimiento (kg ha}^{-1}\text{)} = -4581 + (423 \times MO) - (22 \times M\Delta) + (252 \times Tm_2) + (1,21 \times Rs_3)$$

Error= 443 kg ha<sup>-1</sup>

Ambientes con mayor  $Tm_2$ ,  $Rs_3$ , MO y menor  $M\Delta$  fueron los que produjeron los mayores rendimientos cuando el cultivo inició su ciclo con  $AUI > 200$  mm.

En este trabajo se concluyó que:

- El estado estructural del suelo fue una variable importante para explicar la variabilidad del rendimiento de soja del área en estudio.
- Los rendimientos más altos del cultivo, siempre se alcanzaron en los lotes que presentaron mejores condiciones físicas de suelo, como bajo % de bloques masivos delta en el perfil y/o altos valores de conductividad hidráulica saturada.
- Tanto la temperatura como la radiación solar, fueron relevantes en la explicación de la variación del rendimiento de soja sólo después que se superaron ciertos niveles hídricos ( $pp_{2+3} = 180$  mm o  $AUI = 200$ mm).



Argiudol típico degradado, destacado con color rojo estados masivos  $\Delta$

Dada la importancia del estado estructural del suelo en el rendimiento del cultivo y considerando que el tránsito de maquinarias es el principal factor

que incide en los aspectos físicos, se realizaron estudios para evaluar su efecto sobre el suelo y los cultivos en siembra directa.



Raíz de soja afectada por la densificación



Argiudol típico sin limitantes físicas

## Efecto del tránsito de maquinarias sobre el suelo y los cultivos.

Si bien el uso extensivo de la SD en la región pampeana permitió reducir y limitar los procesos erosivos, la degradación física provocada por el tránsito en húmedo asociada al monocultivo de soja, se convirtió en el factor de mayor riesgo en estos sistemas. La degradación física se manifiesta como una pérdida de la porosidad de los suelos y está asociada a la textura, contenido de materia orgánica y al peso y presión de la maquinaria utilizada (Jorajuría, 2005). Por otra parte, la intensificación en la producción agrícola, generó la aparición de equipos de mayor capacidad de trabajo, un incremento de su peso y un mayor número de pasadas asociados a tratamientos de fertilización y protección del cultivo contra malezas, plagas y enfermedades, aspectos que generalizaron este problema.

La superficie transitada por los rodados de los equipos agrícolas en soja de primera, supera el 69 % del área total en cada campaña, considerando la maquinaria usual del sur de la provincia de Santa Fe (Gerster, datos inéditos). La siembra y pulverización para el control de malezas, requieren que el suelo posea niveles de humedad elevados, coincidiendo en muchos casos con el intervalo de máxima susceptibilidad a la compactación. A su vez, el uso de cultivares de ciclos más cortos (grupos III y IV), produjo un adelanto de la cosecha concentrándose en el mes de marzo, coincidiendo con un periodo de abundantes lluvias.

Steimbach y Alvarez (2006) trabajando sobre una recopilación de ensayos realizados en el área pampeana, observaron que los planteos en SD presentan un incremento de densidad aparente, pero



Huellas generadas por el tránsito sobre suelo húmedo

paralelamente aumentan la estabilidad de agregados y la infiltración, permitiendo un mayor almacenaje de agua para los cultivos. En contraposición a estos autores, otros estudios realizados han detectado un mayor estado de compactación en este sistema (Ferrerías *et al.*, 2001). Sasal *et al.* (2004) observaron una tendencia a la formación de costras superficiales, con un predominio de poros horizontales sobre los verticales, que generan algunas dudas sobre las bondades de la SD cuando no se realiza una adecuada rotación con gramíneas.

Estudios realizados en el efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos, generan muchas veces resultados contradictorios. Esto es lógico, ya que los parámetros físicos que se evalúan habitualmente presentan una relación indirecta con el funcionamiento del cultivo (Letey, 1985; de Battista *et al.* 1994). Taboada y Micucci (2004), destacaron que el efecto de la compactación sobre el rendimiento de los cultivos depende de las condiciones climáticas que interactúan con las propiedades de los suelos. Por este motivo, el efecto de la compactación sobre el cultivo es más grave en condiciones de estrés hídrico y con deficiencia de nutrientes, mientras que en condiciones climáticas favorables, en muchos casos, no se observa efecto perjudicial sobre los cultivos.

Gerster y Bacigaluppo (2005) trabajando en Argiudoles típicos, sobre huellas generadas por el uso de tolvas de doble eje de tipo tradicional, observaron que los sectores transitados presentaban un incremento en la densidad aparente, reducción de la infiltración básica, menor exploración de raíces (Figura 3) y una disminución en los rendimientos de soja y



Plantas de soja desarrolladas sobre suelo transitado en húmedo (izquierda) y suelo no transitado

maíz de hasta un 28 y 15%, respectivamente. Evaluando la presencia de nódulos en el cultivo de soja, se observó una importante reducción de los mismos, tanto en su peso como en su cantidad en las raíces primarias y secundarias (Figura 4).

Las alternativas para reducir o limitar los efectos negativos del tránsito consisten en utilizar maquinarias de menor peso por eje y/o adecuar los rodados para reducir su presión específica sobre el suelo.

Respecto al primer aspecto, es preocupante la tendencia a la utilización de cosechadoras y tolvas con mayor capacidad de trabajo y mayor peso (Jorajuría, 2005), por lo cual, el uso de neumáticos de mayor superficie de apoyo aparece como la alternativa para reducir o limitar los efectos negativos del tránsito de maquinarias. La ventaja de este tipo de rodados, consiste en que permiten reducir la presión específica sobre el suelo ya que distribuyen la carga en su mayor superficie de contacto.

Con el objeto de evaluar el uso de rodados alternativos en tolvas autodescargables, Gers-ter et al, 2009, realizaron un ensayo sobre un suelo Argiudol típico serie Armstrong, con más de veinte años de agricultura y ocho años en siembra directa continua.

Se evaluaron 3 tratamientos: i) sin tránsito (T), ii) tránsito con rodado convencional (RC) y iii) tránsito con rodado especial (RE). La condición de humedad al realizar el tránsito fue cercana a la humedad crítica determinada por el test proctor (prueba de laboratorio que permite determinar en qué nivel de humedad el suelo es más sensible a la compactación).

La presión en el área de contacto rueda/suelo se calculó en base al peso por eje y a la superficie de contacto de los rodados con el suelo (Cuadro 3).

El peso ejercido por el eje trasero del tractor y de la tolva autodescargable utilizados, supera el valor de 36 kN, sugerido por Botta (2005), como valor límite a partir del cual se pueden generar daños acumulativos a nivel subsuperficial.

Se realizaron evaluaciones físicas de suelo: densidad aparente en estratos de 7 cm hasta los 35 cm de profundidad y resistencia mecánica a la penetración (IC) hasta los 50 cm de profundidad. También se evaluó el desarrollo de raíces de soja, mediante el método del perfil expuesto.

En los tratamientos con tránsito se observaron incrementos en los valores de densidad aparente y de resistencia a la penetración (Figura 5). Este estado de mayor degradación, generó patrones diferentes de desarrollo radical.

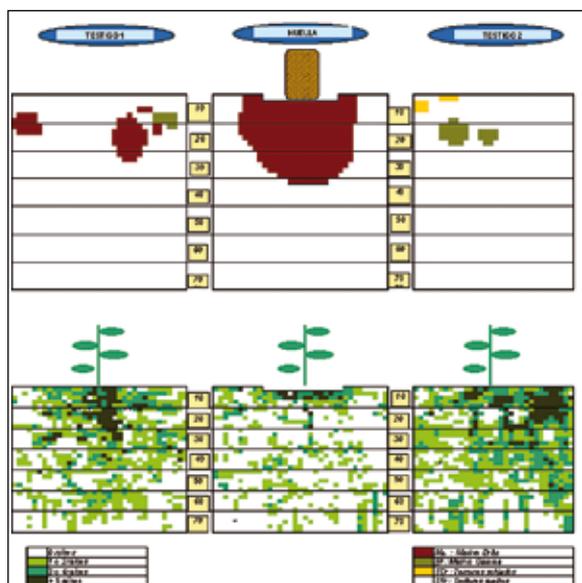


Figura 3: Distribución de raíces de soja en suelo transitado (centro) y sin transitar (izquierda y derecha).

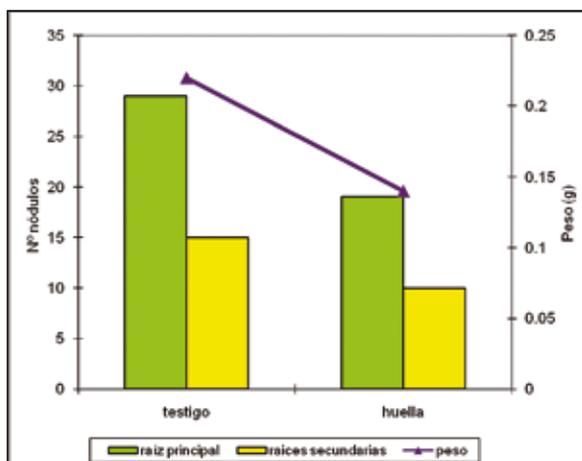


Figura 4: Número y peso de nódulos en raíces principales y secundarias de soja creciendo en suelo transitado (huella) y sin transitar (testigo)

Cuadro 3: Peso, área de contacto y presión ejercida por eje de tractor y monoltolva usados en el tránsito de los tratamientos Rodado convencional (RC) y Rodado especial (RE), en el sur de Santa Fe.

Tratamiento	Tractor			Tolva autodescargable	
	Rodado delantero	Rodado trasero		RC	RE
		RC	RE		
Rodado	750-18 Guía 6T(*)	18-4-34 Dyna Torque(*)	Dual 18-4-34 Dyna Torque(*)	23-1-30 DynaTorque(*)	24-5-32 AWT(*)
Peso por rueda (kN)	6,35	25,40	25,40	58,70	58,70
Peso por eje (kN)	12,70	50,80	50,80	117,40	117,40
Área de contacto por rueda (m <sup>2</sup> )	0,06	0,26	0,45	0,28	0,33
Presión de contacto por rueda (Kpa)	113,02	97,69	56,63	211,17	176,16
Presión de contacto por eje (Kpa)	226,04	195,38	113,27	422,33	352,31

(\*) modelos comerciales de cubiertas de Goodyear®.

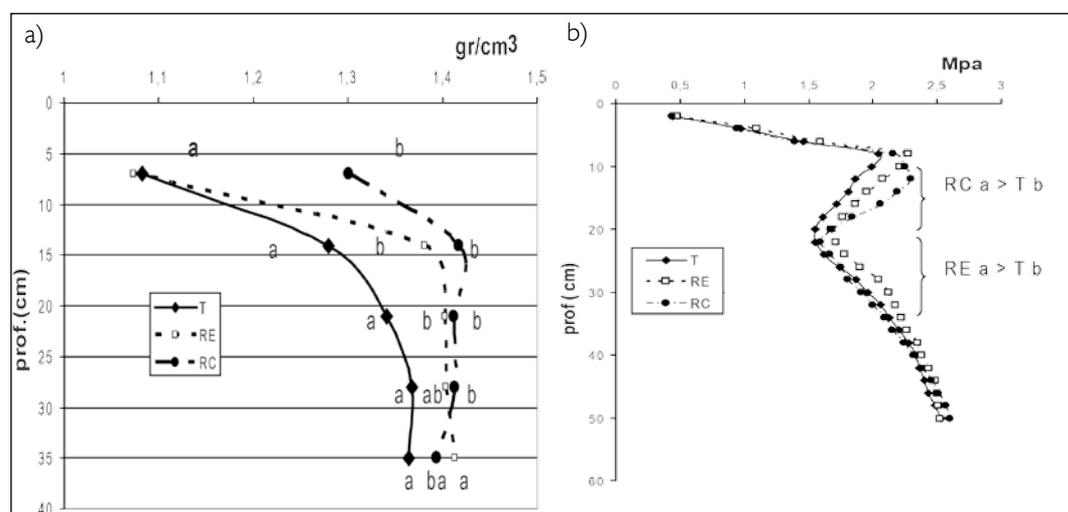


Figura 5: Perfiles de densidad aparente (a) y de índice de cono (b) en los distintos tratamientos. T (testigo), RE (rodado especial), RC (rodado convencional), letras diferentes a una misma profundidad indican diferencias significativas al 0,05 %. Ensayo Rodados, sur de Santa Fe.

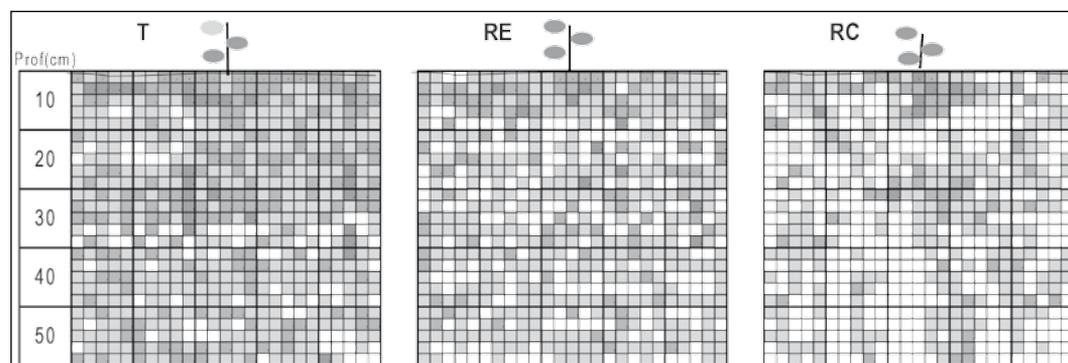


Figura 6: Abundancia de raíces de soja en los perfiles de suelo de diferentes tratamientos. T (testigo), RE (rodado especial) RC (rodado convencional), en el sur de Santa Fe. □ sin raíces □ 1 a 2 raíces □ 3 a 4 raíces □ + de 5 raíces

Analizando los valores de IC registrados en el estrato 10 a 32 cm de profundidad, se observó un efecto diferente de los tratamientos RC y RE. El rodado convencional presentó las mayores diferencias respecto al testigo entre los 12 y 18 cm, mientras que en el rodado especial los valores más elevados se encontraron entre los 22 y 32 cm de profundidad (Figura 5b). Este comportamiento estuvo asociado al efecto diferencial sobre el suelo de los distintos neumáticos utilizados en el tránsito. Estas observaciones coinciden con las realizadas por Voorhess *et al.*, 1986; Hakansson and Reeder 1994; Jorajuría 2005, quienes determinaron que superficialmente el efecto negativo del tránsito está asociado a la presión ejercida por el neumático, mientras que a nivel sub-superficial depende más del peso total del equipo utilizado.

La mayor densificación del suelo, en los tratamientos de tránsito, afectó el desarrollo de las raíces. El testigo presentó mayor abundancia de raíces en todo el perfil de suelo (Figura 6).

En RC, el aumento de los valores de resistencia a la penetración registrados de 10 a 32 cm de profundidad, redujeron la presencia de raíces en este estrato, limitando además la exploración radical en horizontes inferiores. Este efecto de sombreado descrito por Tardieu y Manichom (1987) y Taboada *et al.* (2004), es explicado por una parte, porque solo unas pocas raíces logran atravesar los sectores densificados del perfil y por otra, por la orientación esencialmente vertical de la porosidad inter-agregados del horizonte B2t. En los primeros centímetros de profundidad, se observó mayor presencia de raíces en RC que en RE, ya que ante la presencia de sectores compactos las raíces tienden a concentrarse en los horizontes superficiales.



Figura 7: Tolva autodescargable con rodados especiales.

Se destaca que la presencia de densificaciones superficiales en RC, limitó el crecimiento de raíces en todo el perfil. RE en cambio, presentó un mejor enraizamiento en profundidad, incluso en estratos con valores más elevados de IC.

Si bien los neumáticos especiales favorecieron el desarrollo radical del cultivo, su efecto para atenuar la degradación física provocada por el tránsito es limitado, ya que generan densificaciones a mayor profundidad que los neumáticos convencionales. Su uso continuo podría generar compactación más profunda y difícil de revertir, aspecto que requerirá la realización de estudios secundarios.

Cuando un rodado se desplaza sobre un suelo desnudo, produce efectos muy diferentes a los generados en uno cubierto. La presencia de una abundante cobertura de rastrojos, amortigua parcialmente el efecto del tránsito, dado que el esfuerzo mecánico se realiza sobre un intermediario que disminuye sus efectos negativos sobre el suelo. En lotes destinados a monocultivo de soja en cambio, la escasa cobertura agrava el problema. La ausencia de gramíneas en la rotación, sumada a la escasa actividad biológica de estos sistemas, contribuyen a que los sectores compactos generados por el tránsito, perduren varios años.

### Efecto de la rotación de cultivos sobre el suelo y el cultivo de soja.

El nivel de materia orgánica de un suelo es considerado un indicador de la calidad del mismo y de la sustentabilidad del sistema productivo. La materia orgánica del suelo, está formada por residuos vegetales y animales en distintos grados de descomposición, junto con las arcillas, son los

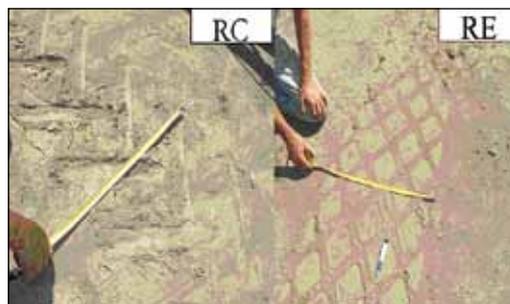


Figura 8: Huellas del rodado convencional (RC) y del rodado especial (RE).

centros activos donde ocurren las reacciones químicas y de intercambio de nutrientes. Además, juega un rol fundamental en la estructura de los suelos contribuyendo a la formación de los agregados.

Las rotaciones de cultivos, la fertilización y el manejo de los residuos, son algunas de las prácticas que mayor efecto ejercen sobre el contenido de materia orgánica del suelo a través del tiempo.

Resultados obtenidos por Lattanzi *et al.* 2005, evaluando el efecto de 30 años de diferentes rotaciones agrícolas, muestran que las secuencias con gramíneas presentan valores de carbono orgánico (CO) más elevado en el horizonte superior (Figura 9). Una mejor nutrición de los cultivos incrementó el contenido de CO en todas las secuencias evaluadas.

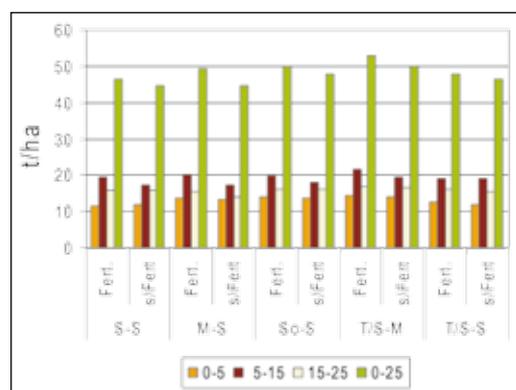


Figura 9: Efecto de cinco rotaciones de cultivos con y sin fertilización sobre el contenido de Carbono total, expresado en t/ha en un suelo Argiudol típico (adaptado de Latanzi *et al.*, 2004). S: soja; M: maíz; So: sorgo; T: trigo.

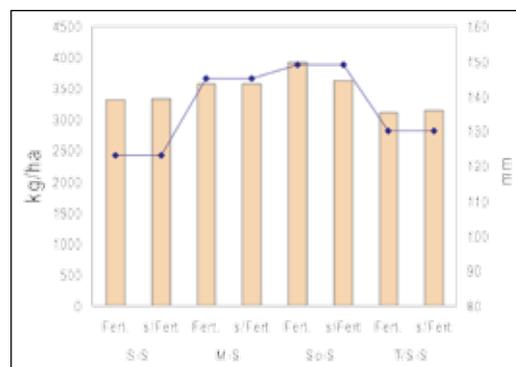


Figura 10: Efecto de cinco rotaciones de cultivos con y sin fertilización sobre el rendimiento medio de 5 años de soja de primera y el agua útil a la siembra hasta 1 m de profundidad (adaptado de Latanzi *et al.*, 2004). S: soja; M: maíz; So: sorgo; T: trigo.

En el mismo trabajo, se destaca el efecto positivo de la inclusión de gramíneas de verano como maíz y sorgo sobre el contenido de agua útil del suelo a la siembra de la soja, siguiendo la misma tendencia que el que el rendimiento de este cultivo (Figura 10).

Respecto a soja de segunda, dichos autores observaron que la inclusión de maíz en la secuencia, permite obtener rendimientos superiores (Figura 11). Al igual que en soja de primera, estos resultados se relacionan con el agua útil acumulada en el perfil a la siembra, hasta el metro de profundidad.

Los sistemas agrícolas permanentes con SD difundidos en la región, pueden ser sustentables utilizando rotaciones y niveles adecuados de fertilización (Lattanzi *et al.*, 2005)

La siembra de un solo cultivo de verano y el uso de barbechos químicos durante el invierno, que mantienen el área libre de malezas el resto del año, generan una subutilización de los recursos disponibles, ya que durante el barbecho, no es

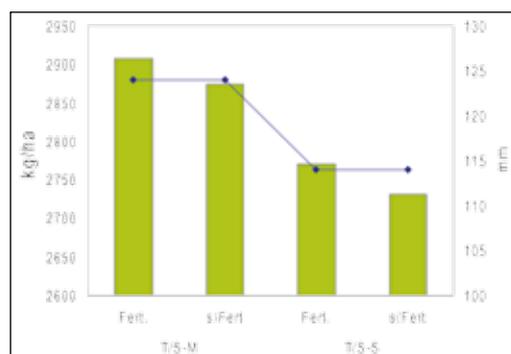


Figura 11: Efecto de dos rotaciones de cultivos con y sin fertilización sobre el rendimiento medio de 5 años de soja de segunda y el agua útil a la siembra hasta 1 m de profundidad (adaptado de Latanzi *et al.*, 2005). T: trigo; S: soja; M: maíz.

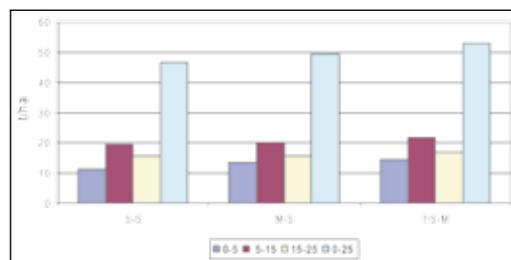


Figura 12: Efecto de tres rotaciones de cultivos sobre el contenido de Carbono total (t/ha) (adaptado de Latanzi *et al.*, 2004). S: soja; M: maíz; T: trigo.

aprovechada la energía solar para generar moléculas orgánicas. La inclusión de un cultivo invernal, permitiría utilizar en forma más eficiente los recursos (radiación, agua), aportando residuos que además de producir granos, permitiría lograr un efecto de cobertura, contribuyendo a un mejor balance de la materia orgánica del suelo (Figura 12).

La presencia de gramíneas de invierno en la secuencia es importante, dado que es común que las raíces de estos cultivos encuentren el suelo húmedo por periodos prolongados, teniendo por lo tanto, mayores posibilidades de crecer en los sectores compactados. En este aspecto, tiene ventajas sobre el cultivo de maíz ya que éste, no siempre se desarrolla con buenas condiciones de humedad en el perfil.

Por otra parte, por el tipo de cobertura y su distribución, al ser cultivos que se implantan en líneas cercanas (19 a 21 cm), presentan características muy favorables para sistemas de siembra

directa continua.

En la Figura 13, se observa el desarrollo de raíces de maíz, trigo y soja en condiciones normales (testigo) y compactadas. Si bien las etapas de crecimiento del sistema radical de los cultivos sucedieron en diferentes momentos del ciclo agrícola, el contenido de humedad del suelo fue similar en todos ellos.

En estas figuras, se observa claramente que el cultivo de soja presentó las mayores dificultades para crecer en áreas compactadas. El trigo fue el que presentó una exploración radical más cercana al testigo. En el maíz, se observó un desarrollo de raíces intermedio pero con una presencia de raíces de mayor diámetro. Estos resultados, destacan la ventaja de incluir en la rotación ambas gramíneas, el trigo por su capacidad de explorar y el maíz por su capacidad de generar poros de mayor diámetro, que son los que contribuyen a lograr una mayor velocidad de infiltración de agua.

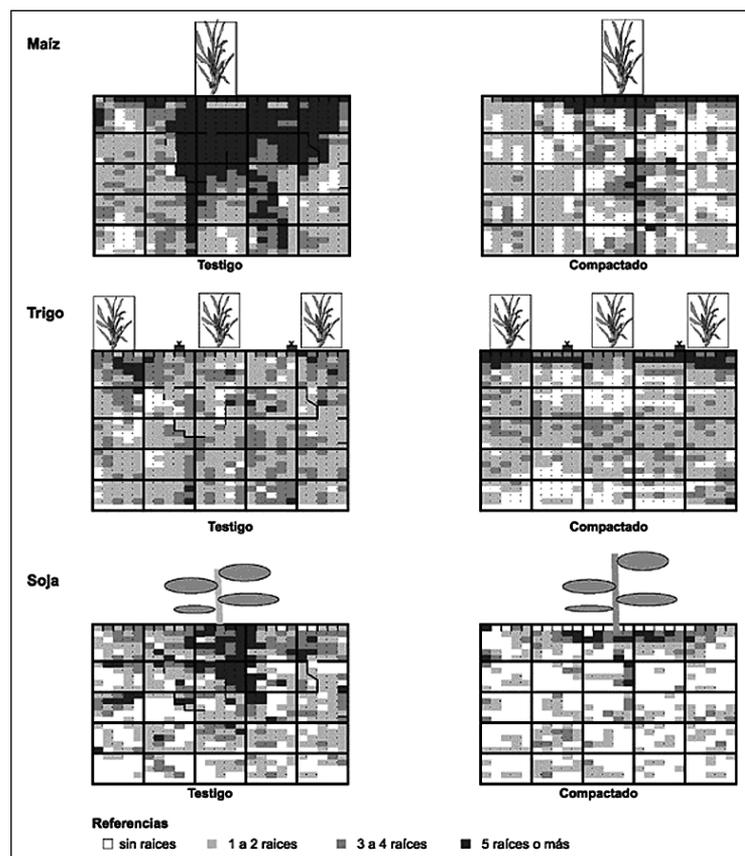


Figura 13: Desarrollo de raíces de maíz, trigo y soja en suelos con (compactado) y sin (testigo) tránsito.

## ¿Secuencia de cultivos o descompactación mecánica?

Se ha sugerido también, el uso de la descompactación mecánica como una alternativa para reducir las impedancias del suelo, sin embargo los resultados de estas experiencias han sido contradictorios, dependiendo fuertemente del tipo de maquinaria utilizada y de las condiciones en que se realizó la descompactación (Alvarez *et al*, 2009; Gerster *et al* 2010). La resistencia mecánica a la penetración (RMP), ha sido sugerida como un indicador para determinar el grado de impedancias físicas en el suelo. En girasol, Diaz-Zorita (2004) mostró que con valores por encima de los 1650 kPa de RMP los rendimientos comenzaban a disminuir. Taboada y Micucci (2004) observaron en soja un umbral de 2000 kPa.

Con el objetivo de evaluar los efectos de las rotaciones con gramíneas y el uso de la descompactación mecánica, se realizó un estudio en un ensayo de larga duración conducido en la Estación Experimental INTA Oliveros (32° 32' S; 60° 51' W) en un suelo Argiudol con severa degradación física (Gerster *et al* 2010).

Los tratamientos evaluados fueron: i) testigo sin descompactar ii) descompactado con escarificador, combinados con 4 secuencias de cultivo: a) soja-soja

(sj-sj); b) soja- cultivo de cobertura-soja (sj-cc-sj); c) maíz-soja-trigo/soja (mz-sj-tr/sj) y d) maíz-cultivo de cobertura-soja-trigo/soja (mz-cc-sj-tr/sj). La descompactación, se realizó con un escarificador marca culti-vie, de 4 rejas a 0.5 m de distancia entre ellas hasta 0,25 m de profundidad.

Tanto la inclusión de gramíneas en la secuencia como la descompactación mecánica, disminuyeron significativamente la resistencia mecánica a la penetración (RMP) (Figura 14), no observándose interacción significativa entre el tratamiento de descompactación y la secuencia. Los efectos de la descompactación mecánica fueron notables en el estrato de los 7.5 a los 25 cm, coincidiendo con la profundidad de trabajo del escarificador. En esta profundidad, los tratamientos testigos tuvieron una RMP entre 18 y 41% superior al tratamiento descompactado. Por su parte, las secuencias que incluyeron gramíneas, mostraron un patrón distinto en la RMP en profundidad, respecto del monocultivo de soja (Figura 14). La RMP no difirió entre secuencias hasta la profundidad de 25 cm. Por debajo de ésta, el monocultivo de soja mostró una RMP entre 15 y 42% superior respecto de las secuencias que incluyeron gramíneas, superando valores de 2000 kPa.

La descompactación mecánica, no mostró efectos directos (después del primer año de realizado

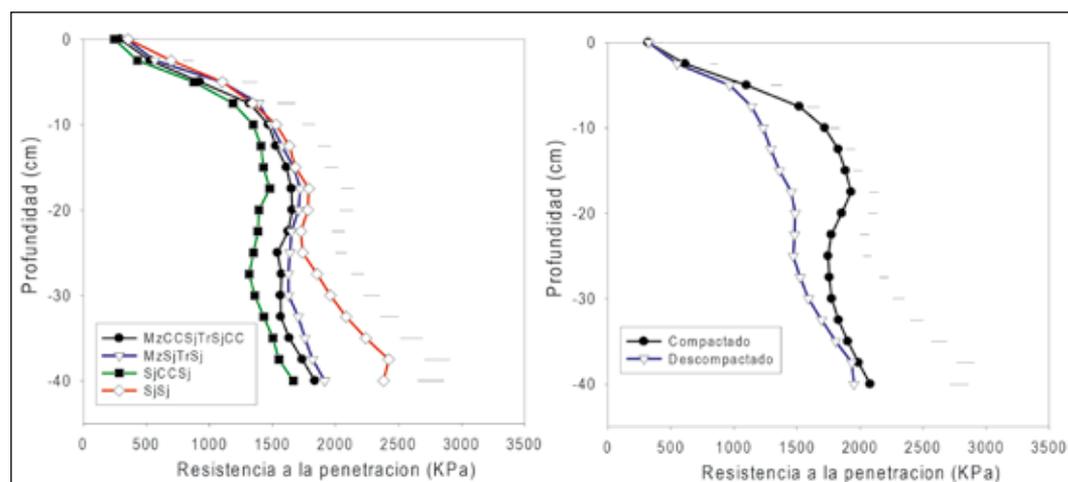


Figura 14: Resistencia mecánica a la Penetración en profundidad según la secuencia de cultivos (panel izquierdo) y descompactación mecánica (panel derecho). Las barras horizontales representan el error estándar para comparación entre medias en cada profundidad (Gerster *et al*, 2010). Mz: maíz; CC: cultivo cobertura; Sj: soja; Tr: trigo.

el escarificado), ni residuales sobre el rendimiento de soja (Cuadro 4). El cultivo de soja sembrado sobre secuencias que incluyeron gramíneas rindió 2473 kg ha<sup>-1</sup>, un 9% por encima del rendimiento de soja en monocultivo (Cuadro 5).

**Cuadro 4: Efecto de la descompactación mecánica sobre los rendimientos de soja en ensayo de larga duración de la EEA INTA Oliveros.**

Campaña agrícola	Tratamiento Descompactación		E.S.
	Testigo	Descompactado	
	kg ha <sup>-1</sup>	kg ha <sup>-1</sup>	
2006/07	3116	3236	67
2007/08	2883	2973	128
2008/09	2450	2397	72

E.S. = error standard de la media

**Cuadro 5: Rendimiento de soja (2008/09) luego del primer ciclo de rotaciones y Materia seca acumulada (2007/08 y 2008/09) en distintas secuencias de cultivo. Ensayo de larga duración de la EEA INTA Oliveros.**

Secuencia	Rendimiento	Materia seca acumulada
	kg ha <sup>-1</sup>	
Sj-Sj-Sj	2278	8240
Sj-CC-Sj-CC-Sj	2465	16531
Tr/Sj-Mz-Sj	2493	20562
Tr/Sj-Mz-CC-Sj	2461	19858
ES	124	

E.S. = error standard de la media

Mz: maíz; CC: cultivo cobertura; Sj: soja; Tr: trigo.

Las impedancias mecánicas del suelo, medidas a través de la RMP, disminuyeron por efecto tanto de la descompactación como por la inclusión de gramíneas en la secuencia. Los tratamientos con escarificado tuvieron menores valores de RMP respecto del testigo después de 3 años de realizada la labor, indicando una residualidad importante de este tipo de labranza. Sin embargo, estos efectos en el suelo no se vieron reflejados en una mejora en el rendimiento en soja.

Los resultados de esta experiencia muestran reducciones en la resistencia a la penetración por

efecto de la inclusión de gramíneas en la rotación y la descompactación mecánica en un corto plazo. Sólo la inclusión de gramíneas incrementó la producción de soja, sugiriendo que los efectos positivos de la rotación podría estar relacionado con una mejora de la condición física del suelo, que le permitiría al cultivo hacer una mayor exploración radical del perfil.

Estos aspectos explican por qué los suelos en siembra directa, con una adecuada rotación de gramíneas, tienen la capacidad de recuperar la estructura. Este proceso, que depende de las características de cada lote (cobertura, materia orgánica, etc.), puede demorar varios años. La inclusión de gramíneas en la rotación permitiría recuperar los sectores densificados, mediante el efecto de las raíces y de la actividad biológica, generando grietas y canales que incrementen la velocidad de infiltración del agua y el desarrollo de raíces de otros cultivos.

**Intensificar la agricultura con una mayor presencia de gramíneas es un desafío, involucra un mayor desarrollo de aspectos técnicos, productivos y empresariales. Es cambiar un sistema de gran simplicidad por otro, más complejo, pero sin duda, más eficiente, rentable y sustentable.**

## Bibliografía

- **Alvarez C., Taboada M., Torres Duggan M., Chamorro E., D'Ámbrosio D.,** 2009. Descompactación de Suelos Franco limosos en Siembra directa: efecto sobre las propiedades físicas y los cultivos. *Revista Ciencia del Suelo* 27 (2) 159-169.
- **Andriani J.,** 2000. Parámetros hídricos de los principales suelos Argiudoles y Hapludoles del sur de Santa Fe. Para mejorar la producción N° 13, EEA INTA Oliveros, pp. 23-26.
- **Bacigaluppo S.; Bodrero M.L.; Balzarini M.; Gerster G.R.; Andriani J.; Enrico J.M.; Dardanelli J.L.,** 2011. Main edaphic and climatic variables explaining soybean yield in Argiudolls under no-tilled systems. *Europ. J. Agronomy* 35 (4) 247- 254.
- **Botta G.,** 2005. Compactación en suelos labrados de baja capacidad portante. *Reología del suelo agrícola bajo tráfico.* Universidad Nacional de la Plata: 73-84.
- **De Battista J.; Andriulo A.; Ferrari M. y Pecorari C.,** 1994. Evaluación de la Condición Estructural del Suelo bajo diferentes sistemas de labranza en la pampa húmeda argentina. 13th International ISTRO Conference,

- Aalborg, Dinamarca, 24-29 July, Vol I: 99-103.
- **Diaz Zorita M.**, 2004. Efecto de la compactación subsuperficial de un hapludol típico sobre la producción de Girasol. *Revista Ciencia del Suelo* 22 (1) 40-43.
  - **Ferreras L.; De Battista J.; Ausilio A. y Pecorari C.**, 2001. Parámetros Físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboreo. *Pesquisa Agropecuaria, Brasilia* Vol. 36 (1): 161-170.
  - **Gerster G.; Gargicevich A., Cordone G. y González C.**, 2002. Factores edáficos y prácticas culturales asociados al rendimiento de soja. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Puerto Madryn: 297.
  - **Jorajuria D.**, 2005. Compactación del Suelo Agrícola inducida por tráfico vehicular. *Reología del suelo Agrícola bajo tráfico*. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Universidad Nacional de la Plata: 39-56.
  - **Gerster G. y Bacigaluppo S.**, 2005. Efecto del tránsito en húmedo sobre el suelo y los cultivos en sistemas de siembra directa. *Actas Congreso Aapresid 2005*: 32-36.
  - **Gerster G.**, 2009. Compactación por tránsito de maquinarias en un Argiudol típico. Tesis de Posgrado. Maestría en Manejo y Conservación de Recursos Naturales. Biblioteca facultad de Ciencias Agrarias UNR, 109 pp.
  - **Hakansson I. and Reeder R.**, 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil and Tillage Research*. Vol. 29: 277-304.
  - **Lattanzi A.; Arce J.; Marelli H.; Lorenzon C. y Baigorria T.**, 2005. Efecto de largo plazo de la siembra directa y de rotaciones de cultivos sobre los rendimientos, el carbono y nitrógeno orgánico en un Argiudol típico de Marcos Juárez. *Jornada de Indicadores de Calidad de Suelo*. Marelli H. (Ed.) Marcos Juárez, Argentina (en cd).
  - **Letey J.**, 1985. Relationship between soil Physical Properties and Crop production. *Advances in Soils Science*. vol 1:277-295.
  - **Marelli H.**, 1998. La siembra directa como práctica conservacionista. *Siembra directa*. Ed. Hemisferio Sur S.A. Argentina: 127-140.
  - **Orellana J.**, 1993. Cambios edáficos inducidos por labranzas convencionales versus siembra directa. *Publicación técnica Facultad de Agronomía y Veterinaria de Esperanza (Santa Fe)* 17 pp.
  - **Pilatti M.; Orellana J.; Priano L.; Felli O. y Grenon D.**, 1988. Incidencia de Manejos tradicionales y conservacionistas sobre propiedades físicas, químicas y biológicas de un Argiudol en el sur de Santa Fe. *Ciencia del suelo* 6 (1): 19-29.
  - **Precop 2**, 2011. Evolución del Sistema Agropecuario Argentino. *Producción Agropecuaria con Valor agregado en origen*. Actualización Técnica N° 64. INTA. [www.cosechayposcosecha.org](http://www.cosechayposcosecha.org).
  - **Sasal C.; Andriulo A.; Taboada M.**, 2004. Orientación de poros en Argiudoles bajo siembra directa continua. XIX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo. Paraná: 44.
  - **Steinbach H. y Álvarez R.**, 2006. Cambios en las propiedades físicas de los suelos pampeanos por adopción de la siembra Directa. XX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo. Salta y Jujuy: 84.
  - **SIIA 2012**. Sistema Integrado de Información Agropecuaria. Ministerio de Agricultura Ganadería y Pesca de la Nación. [www/siia.gov.ar/index.php/series-por-terma/agricultura](http://www/siia.gov.ar/index.php/series-por-terma/agricultura).
  - **Taboada M.; Alvarez C.; Tellería M.**, 2004. Distribución y abundancia de raíces de maíz en argiudoles pampeanos bajo diferentes sistemas de labranza. XIX Congreso Argentino de Ciencias de Suelo. Parana: 60.
  - **Taboada M. y Micucci F.**, 2004. Fertilidad física de los suelos. Facultad de Agronomía UBA. 80 pp.
  - **Tardieu F. y Manichon H.**, 1987. Consecuencias del Estado del Perfil Cultural sobre el enraizamiento, caso del maíz III. *Curso de Física de Suelos INTA Pergamino 1990*: 168-177. Extraído de *Soil Compaction and Regeneration*. G Moniers; M. Goss Editors. Balkena Rotterdam: 131-143.
  - **Vorhess W.; Nelson W. and Randall G.**, 1986. Extend and persistence of subsoil compaction with heavy axle loads. *Soil Science Society of America Journal*, Madison. 50: 428-433. □