

## Capítulo 11

# **Evaluación de la compactación de suelos en sistemas de producción agropecuarios del sur de Santa Fe**

## **Evaluation of soil compaction in Southern Santa Fe agricultural production systems**

Beatriz Adriana Bonel

Néstor Cristian Di Leo

Sergio Montico<sup>1\*</sup> (Ex-Aequo)  
*smontico@unr.edu.ar*

*\* Autor de contacto*

---

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrarias - Universidad Nacional de Rosario - CC14 S2125 ZAA Zavalla - Santa Fe

# ÍNDICE CAPÍTULO 11

■ RESUMEN .....	346
■ ABSTRACT .....	347
■ INTRODUCCIÓN .....	348
■ RASGOS SOBRESALIENTES DEL ÁREA .....	349
■ DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS .....	350
■ METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA EVALUAR LA COMPACTACIÓN .....	351
■ RELACIÓN ENTRE LA COMPACTACIÓN Y ALGUNAS PRÁCTICAS TECNOLÓGICAS DE MANEJO DE SUELOS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIOS .....	351
Cambios físico-mecánicos en el perfil cultural .....	351
■ INFLUENCIA DE LAS LABRANZAS Y LAS ROTACIONES EN LA COMPACTACIÓN .....	357
■ VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CONDICIÓN MECÁNICA .....	362
■ CONCLUSIONES .....	371
■ BIBLIOGRAFÍA .....	371

## ■ RESUMEN

La compactación del suelo es una limitante que afecta a una gran cantidad de variables relacionadas con la funcionalidad y productividad de los sistemas de producción agropecuarios. Los actuales modelos productivos en la región sur de la provincia de Santa Fe, poseen una alta proporción de soja y, mayormente, en monocultivo, con escasa participación de gramíneas en las secuencias agrícolas. Las causas de la compactación están relacionadas con los balances negativos de la materia orgánica, produciendo una disminución de la estabilidad de la estructura. Los procesos erosivos y la falta de cobertura con residuos de cultivos también contribuyen fuertemente a su manifestación.

Asimismo, el pisoteo de los animales y el tránsito de maquinarias en condiciones inadecuadas incrementan la compactación influyendo en la obtención de granos y forrajes. Además, se altera el patrón de crecimiento y desarrollo de las raíces, y la actividad de la macro, mesofauna y de la microbiología edáfica. La compactación posee rasgos y características de estados no lineales y complejos, que requieren de estudios detallados para comprender su real y efectiva incidencia en los procesos y funciones del suelo.

Las investigaciones sobre estados y procesos de compactación deben ampliarse y profundizarse, principalmente en cuanto a determinaciones de magnitudes, escalas, espacialización, severidades, y su correlación con variables de tipo económica. Sería importante avanzar sobre el desarrollo de modelos matemáticos orientados a explicar la construcción del proceso de compactación en diferentes ambientes y su evolución temporal, la búsqueda y confirmación de respuestas a técnicas agronómicas como labranzas, rotaciones, cultivos de cobertura, enmiendas, etc., orientadas a la neutralización de esta limitante, y a la reversión y mejora de las aptitudes físicas de los suelos, las que deben promover propuestas innovadoras de manejo de los sistemas de producción agropecuarios.

### Palabras clave

sistemas de producción,  
compactación,  
prácticas de manejo.

## ■ ABSTRACT

Soil compaction is a limitation that affects a great number of variables related to the functionality and productivity of agricultural production systems. The present productive models in the southern region of the province of Santa Fe have a high proportion of soybean and, mainly, monoculture, with little participation of grasses in the agricultural sequences. Causes of compaction are related to the negative balance of organic matter, resulting in a decrease in the stability of the structure. Erosive processes and the absence of coverage with crop residues also contribute strongly to its manifestation. Cattle trampling and the traffic of farm machinery under inadequate moisture conditions increase compaction, influencing yields of grains and forage productivity. Also, the pattern of growth and development of the roots and the activity of macro, mesofauna and edaphic microbiology are altered. Compaction has features and characteristics that could be nonlinear and very complex, which require detailed studies to understand its real and effective impact on soil processes and functions. Research that focus on state and processes that belongs with soil compaction should be expanded and further explored, mainly in terms of determinations of magnitudes, scales, spatial variations, severity, and their correlation with economic variables. It would be important to advance in the development of mathematical models to explain the construction of the compaction process in different environments and their temporal evolution, the search and confirmation of responses to agronomic techniques such as tillage, rotations, cover crops, to the neutralization of this limitation, and to the reversal and improvement of the physical abilities of the soils, which should promote innovative proposals for the management of agricultural production systems.

**Keywords** | production systems,  
compaction,  
management practices.

## ■ INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo es una limitante que afecta a muchas variables relacionadas con su funcionalidad, y con ello, la productividad de los sistemas de producción. Los impactos negativos que posee sobre la transferencia de agua y gases, perjudican de manera significativa, procesos vinculados con la fertilidad, el enraizamiento, la condición física-mecánica y la actividad biológica. Sus causas son diversas, y entre las más sobresalientes se destacan las naturales, vinculadas con la textura, y las antrópicas, relacionadas con las labranzas, las rotaciones, el pastoreo y el tránsito de maquinarias.

Los actuales planteos productivos en la región sur de la provincia de Santa Fe, se caracterizan por una dominancia de la producción de soja y una gran proporción en monocultivo, con escasa participación de gramíneas en las secuencias agrícolas. Balances negativos de materia orgánica poseen una íntima relación con la manifestación de la compactación, destacándose la disminución de la estabilidad de la estructura.

Los procesos erosivos ocasionan severas pérdidas de los horizontes superficiales en varias de las cuencas de la región. Ello, produce un importante cambio de las propiedades físicas, contribuyendo decisivamente a la compactación. La baja cobertura con residuos de cultivos y vegetación espontánea, potencia este tipo de degradación. La ganadería bovina de cría, invernada y tambo, cuando no respetan los tiempos de descanso de las pasturas y/o la oportunidad de ingreso de los animales a los lotes, generan densificaciones por pisoteo y amasado de suelo, que conspiran fuertemente contra la obtención de calidad y cantidad de forraje y las funciones del suelo. El tránsito de las maquinarias, de cada vez mayor peso, implica un efecto de los rodados sobre la superficie que promueve grandes dificultades para el ingreso de agua al perfil, principalmente por la disminución de la porosidad, desencadenando también problemas para la emergencia y establecimiento de las plántulas de los cultivos y forrajeras.

La compactación altera el soporte mecánico edáfico conformado por la relación de sólidos y vacíos, y con ello ejerce un fuerte control sobre la arquitectura de las raíces y la eficiencia con la que exploran el perfil. Esta condición tiene influencia sobre la adquisición por parte de la planta de los recursos necesarios para su normal desarrollo.

Además, la compactación genera un nuevo ambiente en los perfiles culturales que altera la actividad de la macro y mesofauna y de la microbiología, modificando las poblaciones, su distribución y las funciones básicas de la biota.


El avance de la agricultura de precisión en las propuestas de manejo de cultivos y pasturas exige de un mayor detalle respecto al conocimiento de la distribución espacial de la compactación, de modo de poder luego establecer prescripciones técnicas para su neutralización. Así, la utilización de mapas de rendimiento, imágenes satelitales y de drones, y el uso de sistemas de información geográfica son valiosos recursos para su valoración.

Actualmente, el estado del conocimiento sobre las condiciones predisponentes y las acciones directas que controlan los procesos de compactación como su caracterización a campo, han alcanzado dispar desarrollo.

Se considera necesario y conveniente disponer de cartografía de base que muestre los diferentes estados de compactación de los suelos de la región, asociados a sus características genéticas. También habría que profundizar los estudios sobre la influencia de las relativamente recientes propuesta técnicas como los cultivos de cobertura, el manejo de los residuos de cosecha y la utilización de neumáticos de las ma-

quinarias y estrategias de rodado de los lotes. Sería importante avanzar sobre el desarrollo de nuevos recursos instrumentales que posibiliten evaluar a campo presencia de sectores o capas compactas.

## ■ RASGOS SOBRESALIENTES DEL ÁREA

El área donde principalmente se desarrollaron las investigaciones que se presentan en el ítem 5 corresponde a la Pampa Ondulada del sur santafesino **Figura 1** .

La región se encuentra dentro de un dominio eólico donde los sedimentos presentes fueron transportados por vientos del sudoeste en el Pleistoceno final. El manto de loess posee un espesor variable que varía entre 2 y 5 m. Geomorfológicamente, el área está conformada por un conjunto de bloques tectónicos basculados, generalmente hacia el noroeste, limitado por un sistema de fracturas de orientación noroeste-sureste. El atributo geomorfológico más importante está constituido por las largas y suaves pendientes que constituyen los bloques, ocupadas en su tramo final por amplias depresiones pantanosas salinizadas (cañadas). Las cañadas menores surcan esas pendientes y son perpendiculares a estas grandes depresiones, asemejando cada uno de los bloques a “escalones” ubicados en posiciones topográficas más bajas hacia el río Paraná.



**Figura 1:** Regiones naturales de Santa Fe (<http://mapoteca.educ.ar/files/index.html.1.1345.html>). Ubicación de la Pampa Ondulada.

**Figure 1:** Natural regions of Santa Fe province (<http://mapoteca.educ.ar/files/index.html.1.1345.html>). Location of the Rolling Pampa.

Este paisaje condiciona en gran medida el movimiento de las aguas superficiales, produciéndose en algunos sectores, después de intensas lluvias, condiciones de anegamientos de diversos grados de afectación.

Topográficamente se caracteriza por estar a menos de 100 m sobre el nivel del mar, posee lomas suaves y extendidas, y pendientes de 1% y 3 %. Los ríos y arroyos que la atraviesan tienen dirección perpendicular al Paraná con valles fluviales con barrancas, terrazas y meandros.

El río Carcarañá es el principal curso de esta área y se forma por la unión de los cauces de los ríos Tercero y Cuarto, de la provincia de Córdoba. Atraviesa totalmente la provincia en dirección suroeste-noroeste y cuando se aproxima a su desembocadura, su cauce va adquiriendo mayor horizontalidad. Al sur del río, se encuentran de este a oeste, arroyos colectores de las lagunas y cañadas de la zona. Los principales son el Saladillo y el Pavón.

Las cuencas hidrográficas más importantes son las del río Carcarañá, arroyos San Lorenzo, Luedueña, Frías, Seco, Pavón y del Medio; y las cañadas de Gómez, del Chupino y de los Leones.

El clima es subúmido húmedo mesotermal con escaso o nulo déficit hídrico. Las lluvias anuales promedio son del orden de los 973 mm y la temperatura media anual es de 17 °C con una mínima de 10,8 °C y una máxima de 23,1 °C. El período libre promedio de heladas comprende 266 días.

## ■ DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS

Los suelos predominantes son Argiudoles, Argialboles, Natralboles y Natracualfes con capacidades de uso I, II y III, y en las áreas vinculadas a los arroyos son de clase VI y VII.

Los suelos con drenaje impedido y/o sódicos están restringidos a las depresiones y planos de inundación de los arroyos.

Los pedones representativos del área donde se llevaron a cabo la mayoría de las experimentaciones presentadas en el ítem 5, se describen a continuación:

Serie Casilda (Argiudol típico)									
HORIZONTE		Ap	BA	Bt1	Bt2	Bt3	BC	C	Ck
Profundidad	cm	0-18	18-27	27-48	48-76	76-104	104-128	128-180	180-210
Mat. orgánica	%	2,55	2,29	1,22	1,00	0,50	0,28	0,16	0,10
Arcilla < 2 $\mu$	%	19,9	28,6	33,1	46,9	38,1	29,2	20,1	21,5
Limo 2-50 $\mu$	%	69,9	64,4	61,7	49,6	55,8	62,8	67,8	68,2
Arena >50 $\mu$	%	10,2	7,0	5,2	3,5	6,1	8,0	11,6	8,2
pH agua (1:2,5)	---	6,2	6,4	6,6	7,0	7,1	6,8	7,5	8,2
Sat.bases, (S/T)	%	78	83	85	85	92	95	---	
Serie Roldán (Argiudol típico/vértico)									
HORIZONTE		A1	A2	BA	Bt1	Bt2	BC	C	
Profundidad	cm	3-12	18-25	30-38	45-80	100-130	150-175	190-210	
Mat. orgánica	%	3,28	1,95	1,38	0,88	0,33	0,21	0,16	
Arcilla < 2 $\mu$	%	23,7	26,3	28,6	50,7	33,1	19,8	18,4	
Limo 2-50 $\mu$	%	74,1	71,3	68,4	47,1	63,6	76,9	77,6	
Arena >50 $\mu$	%	2,2	2,4	3,0	2,2	3,3	3,3	4,0	
pH agua (1:2,5)	---	5,9	6,5	6,5	6,7	6,9	7,1	8,1	
Sat.bases, (S/T)	%	87	89	90	91	94	96	---	
Serie Zavalla (Natracualf típico)									
HORIZONTE		E	Bt1	Bt2	BC	C			
Profundidad	cm	0-20	20-60	60-85	85-132	+132			
Mat. orgánica	%	2,10	0,79	0,29	0,12	0,14			
Arcilla < 2 $\mu$	%	19,5	55,6	42,3	20,8	19,1			
Limo 2-50 $\mu$	%	76,2	42,4	54,6	73,8	73,8			
Arena >50 $\mu$	%	4,3	2,0	3,1	5,4	7,1			
Conductividad	mmhos/cm	---	8,0	10,9	9,0	6,2			
pH agua (1:2,5)	---	6,7	8,1	8,1	7,8	8,4			
(Na+/T)	%	9,1	20,9	18,7	17,4	14,9			
Sat.bases, (S/T)	%	87	---	---	98	---			

## ■ METODOLOGÍAS UTILIZADAS PARA EVALUAR LA COMPACTACIÓN

Las metodologías que se utilizaron en los trabajos experimentales desarrollados en la región, se apoyaron en valoraciones de penetrometría vertical y de pared en perfiles culturales, a través de instrumentos digitales y mecánicos. Los mismos estuvieron principalmente orientados a reconocer y comparar los índices de cono en situaciones modificadas por distintas prácticas tecnológicas, además de buscar asociaciones entre ellas.

También se recurrió a lógica difusa como un recurso para optimizar la clasificación de rangos de compactación ante las incertezas y vaguedades de las determinaciones obtenidas, principalmente apoyadas en la no linealidad de la expresión de la condición mecánica.

Además se articularon mediciones de densidad aparente, infiltración, porosidad y agrietamiento, para la descripción de procesos y estados de compactación.

Mediante microscopía estereoscópica se caracterizó la microestructura en suelos sometidos a distintos prácticas tecnológicas, a través de las diferencias en el tamaño y morfología de agregados y poros. Este abordaje metodológico posibilita establecer condiciones mecánicas y funcionales de los suelos ante diferentes causas de compactación.

Los estudios del crecimiento, la arquitectura y la eficiencia en la exploración de la raíces de cultivos fueron sensibles a la caracterización de los estados de compactación, y aportaron a la comprensión de la reacción de los suelos sometidos a diferentes tipos de uso y herramientas.

El análisis de la evolución de componentes del balance hídrico edáfico y del consumo de agua de los cultivos, brinda una dimensión de la incidencia de la compactación sobre su rendimiento y la posibilidad de establecer asociaciones con los usos del suelo.

También, comparar distintas calidades estructurales con la condición mecánica edáfica posibilita interpretar el vínculo entre ambos atributos.

La incorporación de la compactación a los enfoques de resistencia y resiliencia sistémicas resultaría propicia para comprender su rol en las funciones y procesos tanto edáficos como productivos.

La aplicación de la geoestadística permite estimar o predecir el valor de indicadores edáficos relacionados con la compactación. Estos se encuentran espacialmente distribuidos en sitios donde se obtuvo información cuantificada en posiciones discretas en el espacio. Se recurrió a la consecución de la tres etapas: análisis exploratorio de los datos, análisis estructural (variogramas) e Interpolación kriging.

## ■ RELACIÓN ENTRE LA COMPACTACIÓN Y ALGUNAS PRÁCTICAS TECNOLÓGICAS DE MANEJO DE SUELOS EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGROPECUARIOS


### Cambios físico-mecánicos en el perfil cultural

Cuando se evalúa la capacidad productiva de un suelo, la descripción del perfil edáfico permite distinguir las capas de origen genético, a la vez que provee características de algunas propiedades físicas y químicas. Sin embargo, al observar un corte vertical del suelo, aparecen -particularmente a nivel superficial- signos o elementos que generalmente no son descriptos en el perfil edáfico. Muchos de estos elementos están estrechamente relacionados al manejo productivo, esto es: su manifestación es conse-



cuencia de la acción de los instrumentos de labranza, de la forma de incorporación de los residuos de cosecha, del tránsito de maquinarias o de otras prácticas antrópicas. Algunos de los aspectos distinguibles son las compactaciones por rodadura o tránsito animal, costras superficiales, capas densificadas de origen mecánico, raíces deformadas ante resistencias mecánicas del suelo, pedotúbulos originados por la macrofauna edáfica, grietas, etc., cuyo origen no es genético. Surge así el concepto de perfil cultural, el cual puede definirse como el conjunto formado por la sucesión de capas de suelo individualizadas por la intervención de los instrumentos de labranzas, las raíces de los vegetales y los factores que reaccionan a estas condiciones.

En la pampa húmeda el proceso de agriculturización resultó en una degradación física generalizada, con pérdidas importantes de materia orgánica, estructura y capacidad de infiltración de los suelos afectando la sustentabilidad de los sistemas de producción. Es sabido que el mantenimiento de la cobertura de rastrojos preserva al suelo del deterioro por su acción relacionada con el flujo de materia y energía. Los residuos en superficie propician la formación de agregados de mayor tamaño, y de un tamaño medio de agregados también mayor. La modificación de la estructura superficial de suelo repercute en la capacidad del sistema de poros para desalojar en forma lenta el aire contenido en los agregados frente al ingreso del agua.


En un Argiudol típico correspondiente a la serie Marcos Juárez (limosa fina, mixta, térmica) se evaluaron lotes con manejo superficial (RS) y semi-incorporado (RI) de rastrojos e historias de uso similares, marcando diferencias en la localización de los residuos dentro del perfil cultural. Se observó que los lotes agrícolas presentan importantes disminuciones de carbono orgánico de suelo respecto a situaciones más conservadas (MC) **Tabla 1** , impactando sobre la estabilidad de los agregados frente a la acción del agua y propiciando el encostramiento superficial. Se comprobó que la desagregación se da principalmente por hinchamiento y dispersión, siendo que aproximadamente 50% de agregados rompen por esta causa y un 35 % rompen por estallido al no poder desalojar el aire en forma adecuada frente al ingreso del agua en los poros (Bonel, 2000).

**Tabla 1:** Carbono orgánico total (Corg), liviano (Cliv) y ligado (Clig). Estabilidad al agua, pretratamiento alcohol (Ag OH), sin pretratamiento (Ag H<sub>2</sub>O) y estabildades relativas (Er) en lotes con residuo superficial (RS), incorporado (RI) y lotes de máxima conservación (MC).

**Table 1:** Total organic carbon (Corg), light carbon (Cliv) and bounded carbon (Clig). Water stability, pretreatment with alcohol (Ag OH), without pretreatment (Ag H<sub>2</sub>O) and relatives stabilities (Er) in fields with crop residues on soil surface (RS), with crop residues incorporated into soil (RI) and soil with maximum conservation state (MC).

Situación	%Corg	%Cliv	%Clig	%Ag OH	Er OH	%Ag H <sub>2</sub> O	Er H <sub>2</sub> O
RS	2,01	0,18a	1,83	53	66	19	25
RI	2,05	0,25b	1,80	49	60	13	18
MC	3,61	0,51	3,10	81	100	75	100

Letras distintas en igual columna indican diferencias significativas (p=0,05).


En lotes agrícolas si se elimina la cobertura superficial se produce sellado de poros, por desagregación y baja resistencia de las uniones de los coloides minerales y orgánicos. El índice de sellado relativo (IS), para una intensidad de lluvia de 65 mm h<sup>-1</sup> y una energía cinética de 12 kJ m<sup>-3</sup>, en lotes agrícolas difiere de las situaciones conservadas de referencia **Tabla 2** . La disminución de la conductividad hidráulica al someter una muestra de agregados menores de 4 mm al impacto directo de la gota de lluvia se ve más afectada en lotes agrícolas (Bonel, 2000). La siembra directa de cultivos por sí

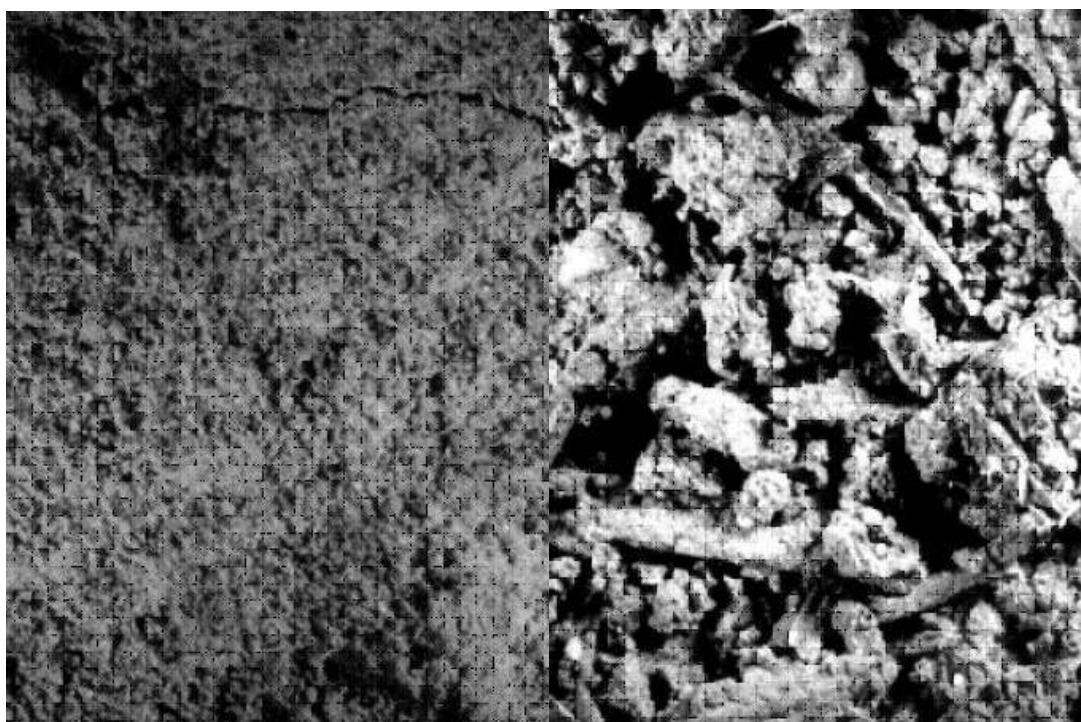
sola no mejora la estabilidad de los agregados, el beneficio surge de la protección superficial que evita la formación de sellos.

**Tabla 2:** Disminución de relativa (IS) de la conductividad hidráulica ( $K_h$ ) del ensayo con (CC) y sin cobertura (SC) para agregados menores de 4 mm en lotes con residuo superficial (RS), incorporado (RI) y lotes de máxima conservación (MC).

**Table 2:** Relative decrease (IS) of hydraulic conductivity ( $K_h$ ) in experiment with (CC) or without (SC) soil cover for aggregates < 4mm in fields with crop residues on soil surface (RS), with crop residues incorporated into soil (RI) and soil with maximum conservation state (MC).

Situación de manejo	$K_h$ (cm hora <sup>-1</sup> )		IS relativo
	CC	SC	
RS	3,70	5,55	33 %
RI	3,52	5,02	30 %
MC	6,39	6,59	3 %

La observación directa de la superficie y de los planos verticales mediante microscopía estereoscópica en luz incidente marcan diferencias entre la situación conservada del Argiudol típico serie Marcos Juárez y lotes agrícolas. Según apreciación visual, existen diferencias en el tamaño y morfología de agregados y poros **Figura 2** . En lotes agrícolas con residuos en superficie aparece una jerarquía mayor de agregación de aspecto liso y con baja porosidad, que funcionalmente sería apropiada. Donde los residuos se incorporan la morfología de los agregados individuales es más adecuada, pero predominan agregados pequeños dando un aspecto liso en conjunto, y creando condiciones no favorables para el ingreso de agua en el suelo (Bonel & Morrás, 2000).



**Figura 2:** Morfología superficial de suelos con diferentes manejo de residuos de cosecha: superficial (RS) a la izquierda e incorporado (RI) a la derecha.

**Figure 2:** Surface morphology of soils with different crop residue management: surface (RS) to the left and incorporated (RI) to the right.

La disminución de las labranzas contribuye a conservar la continuidad de macroporos, y permite la transferencia de fluidos (agua y aire), facilitando de esta manera el crecimiento de las raíces y la actividad de los microorganismos. Los suelos bajo siembra directa generalmente presentan menor espacio poroso, aunque la red de poros es generalmente más continua debido a la acción de lombrices y raíces. Análisis micromorfológicos de lotes agrícolas revelan abundantes restos vegetales en superficie, rasgos de origen biológico y una microestructura esponjosa a grumosa.

Por debajo de la superficie, se destaca la aparición de estructuras y agregados laminares, con predominio de fisuras y huecos horizontales. Abajo de esta capa la porosidad es menor que en lotes laboreados, apareciendo también fisuras y cavidades menos marcadas que en la capa anterior con disposición horizontal. Cuando se incorporan los residuos aparecen costras superficiales, escasa porosidad (representada por fisuras horizontales y vesículas) y escasos restos orgánicos en superficie.

Las estructuras laminares presentes en lotes sin remoción y las costras superficiales temporarias que se producen al incorporar residuos de cosecha restringen la mezcla del material orgánico con la fracción mineral del suelo. La estructura platiforme en suelos limosos y francos se presenta generalmente después del tránsito repetido. Probablemente la aparición de la estructura laminar en lotes no laboreados se deba al efecto del paso de las maquinarias utilizadas en la fertilización y protección de los cultivos y en la cosecha de granos y a la falta de remoción que regenere la macroporosidad, tal como ocurre el suelo laboreado. La disminución de las labranzas favorece el mantenimiento de la continuidad de macroporos, debido a la acción de lombrices y raíces. No obstante, en los primeros 10 centímetros del suelo en siembra directa, predominaron los huecos con sentido horizontal (Bonel *et al.*, 2005).

Lotes agrícolas sin labranza, a pesar de mantener cobertura, son susceptibles a la formación de sellos superficiales, estratificación de restos orgánicos y estructura laminar en los primeros centímetros como resultado de la compresión vertical por tránsito y falta de remoción del suelo. Esto suele ocurrir cuando la actividad biológica es escasa. Lotes laboreados, aunque sea en forma reducida, presentan disminución de la cobertura de residuos y de la fauna del suelo. Como consecuencia del impacto de las gotas de lluvia se generan costras superficiales con poros planares orientados horizontalmente y poros vesiculares, aunque por debajo de la costra laminar se observa una estructura con huecos irregulares interconectados, resultantes del laboreo mecánico.

En los suelos conservados la porosidad total es mayor y está relacionada con una importante actividad biológica. En estos Argiudoles típicos predominan macroporos alargados de un tamaño entre 1000 y 3000  $\mu\text{m}$ , en distintas proporciones y orientación vertical excepto en lotes agrícolas sin laboreo, donde predominan los poros horizontales (Morrás *et al.*, 2008).

En otra escala de trabajo, la detección e identificación de fisuras o grietas en el análisis de los perfiles culturales provee información acerca del posible movimiento del agua en el interior del suelo. Estudios de flujos preferenciales en Argiudoles vérticos de la serie Roldán bajo siembra directa con y sin labor de descompactación señalan la importancia de estos poros en ambos casos, así como la presencia de la red de macroporos estables resultantes de la actividad de las raíces y de la fauna edáfica bajo el no disturbio, y de la fragmentación mecánica en el caso de la intervención del perfil con escarificadores (Vilche *et al.*, 2010).

El crecimiento, la arquitectura y la eficiencia en la exploración edáfica por parte de las raíces son especialmente importantes para la adquisición en tiempo y espacio de recursos del suelo.

Por otra parte, la compactación por tránsito condiciona el comportamiento fractal de las raíces. En un ensayo realizado en un Argiudol vértico de la serie Peyrano con diferentes niveles de compactación, se demostró que a mayor compactación, las raíces de soja en las primeras etapas de crecimiento, presentan menores bifurcaciones y mayor longitud de ejes **Tablas 3** y **4**, reduciendo la capacidad de exploración del sistema radical, con la consiguiente reducción de las posibilidades de captación de agua y nutrientes (Montico & Bonel, 2005).

Las medidas de resistencia a la penetración detectan cambios que pueden relacionarse con la exploración efectuada por las raíces ya que presenta una alta sensibilidad en la detección de sectores diferenciados por grados de compactación. Es así que comparando perfiles culturales se observa en sistemas bajo labranza vertical mayor heterogeneidad físico-mecánica que en el de siembra directa, principalmente entre los estratos 15-20 cm. La situación de no remoción es más compacta desde la superficie y más uniforme, pero presenta mayor número de raíces totales (Vilche *et al.*, 1998).

**Tabla 3:** Valores de Índice de Cono (IC) a la siembra de soja bajo diferentes tratamientos de compactación.

**Table 3:** Cone Index (CI) values at soybean sowing under different compaction treatments.

Espesor (cm)	IC (MPa)		
	CHO	CH1	CH2
0 - 5	0,43 c	0,58 b	0,88 a
5 - 10	0,49 c	0,64 b	0,94 a
10 - 15	0,47 c	0,71 b	1,12 a
15 - 20	0,66 c	0,82 b	1,23 a
20 - 25	0,69 c	0,88 b	1,24 a
25 - 30	0,63 c	0,85 b	1,16 a

CHO: sin compactación por tránsito; CH1: tractor con un peso de 4.500 kg, CH2: tractor arrastrando un acoplado de dos ejes con un peso total de 10.000 kg.




**Tabla 4:** Longitud de los ejes radicales hasta bifurcación. DDS: días desde la siembra.

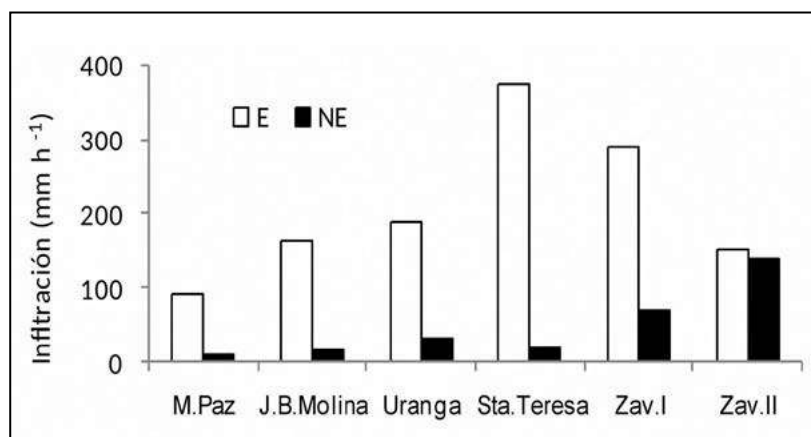
**Table 4:** Length of the radical axes up to bifurcation. DDS: days since sowing.

		Longitud de los ejes radicales (cm)		
DDS	Tratamiento	1° eje	2° eje	3° eje
28	CHO	4,22 a	0,36	--
	CH1	2,16 b	--	--
	CH2	1,89 c	--	--
56	CHO	nl	1,50 a	0,24
	CH1	7,00 a	0,22 b	--
	CH2	4,10 b	--	--
84	CHO	nl	nl	0,53
	CH1	nl	1,11	--
	CH2	8,61	--	--

nl = no incrementó su longitud

CHO: sin compactación por tránsito; CH1: tractor con un peso de 4.500 kg, CH2: tractor arrastrando un acoplado de dos ejes con un peso total de 10.000 kg.

Los perfiles más sueltos que se logran tras el uso de escarificadores favorecen la infiltración del agua **Figura 3** , manteniendo una relación lineal con el grado de aflojamiento en el espesor 5-15 cm **Figura 4** . Este efecto fue comprobado en Argiúdoles vérticos y típicos sobre parcelas escarificadas y no escarificadas de las localidades de Máximo Paz, J. B. Molina, Uranga, Santa Teresa y Zavalla de Santa Fe (con dos historia de uso diferentes simbolizadas por I y II). En algunos casos se observó aumento de rendimiento en situaciones escarificadas, lo que estaba relacionado con la disminución de la resistencia a la penetración medida como el IC y con el aumento de la infiltración **Figura 5**  (Bonel & Montico, 2007).

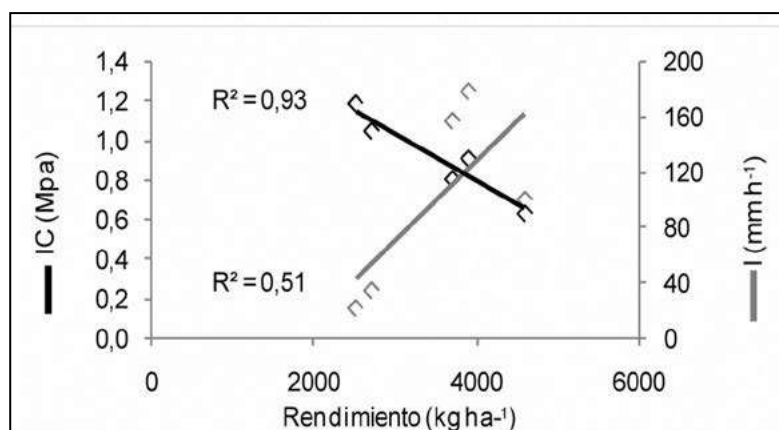
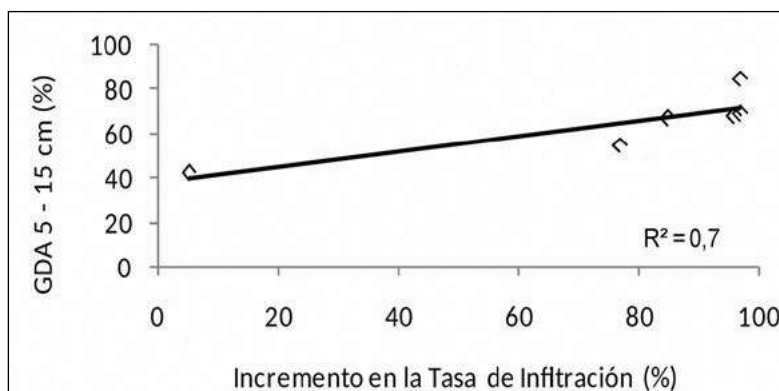


**Figura 3:** Infiltración de agua en parcelas escarificadas (E) y sin escarificar (NE).

**Figure 3:** Water infiltration in scarified (E) and non scarified (NE) plots.

**Figura 4:** Variación de la infiltración (I) en función del grado de aflojamiento (GDA) Espesor 5 - 15 cm.

**Figure 4:** Variation of the infiltration (I) as a function of the degree of loosening (GDA) Thickness 5 - 15 cm.



**Figura 5:** Variación del rendimiento del cultivo de soja en Máximo Paz, J. B. Molina & Uranga. Relación con el Índice de cono (IC) y la infiltración (I). Campaña 2004 -2005.

**Figure 5:** Variation of soybean crop yield in Máximo Paz, J. B. Molina & Uranga. Relationship with cone index (IC) and infiltration rate (I). 2004 -2005.



## ■ INFLUENCIA DE LAS LABRANZAS Y LAS ROTACIONES EN LA COMPACTACIÓN

Una de las posibilidades para la eliminación de las capas densas y el aumento de la remoción del suelo, es la labranza profunda con escarificadores, la que además favorece el desarrollo de las raíces y la infiltración del agua, manteniendo la cobertura del suelo. La medición de la resistencia a la penetración permite detectar los cambios producidos por esta labranza en el perfil del suelo y está afectada por su textura, la resistencia mecánica, el contenido de humedad, la velocidad de penetración y las características del cono utilizado en la punta penetrométrica. La distribución espacial de los sitios compactados en un perfil edáfico puede ser determinada por la penetrometría de pared expuesta, pero la clasificación de los intervalos de resistencia a la penetración representa una dificultad metodológica, debido a la característica analógica de los registros espaciales. En un trabajo de campo realizado en un Argiudol vértico laboreado con escarificador, se recurrió a la lógica difusa para abordar la complejidad en la definición de los diferentes rangos o estratos de valores que no poseen entidad discreta. El tratamiento de lógica difusa de datos de resistencia a la penetración (RP), en un perfil de suelo alterado por la labor de escarificado permitió reconocer la distribución espacial de los estados de compactación. En trincheras de 50 cm de ancho x 35 cm de profundidad, mediante una grilla con un cuadriculado de 5 cm de lado se midió la resistencia a la penetración con un penetrómetro manual, y con un clasificador de probabilidad de un sistema de información geográfica se identificaron siete clases por rango de resistencia a la penetración **Tabla 5** ©. Los registros de RP se corrigieron a 18% de humedad. Cada clase representa la proporción espacial dentro del perfil estudiado que posee similares valores de RP.

La aplicación de este recurso pudo diferenciar clases por compactación para diferentes espesores de suelo **Tabla 6** ©, destacándose un importante efecto de la labor de escarificado entre 5-25 cm.

**Tabla 5:** Superficie de la trinchera ocupada por cada clase difusa. Valores seguidos de letras distintas en sentido horizontal diferencian medias para  $p < 0,05$ .

**Table 5:** Area of the trench occupied by each fuzzy class. Values followed by different letters in the line means statistically differences for  $p < 0.05$ .

Clase	Escarificado	No Escarificado
	% de la superficie de trinchera	
1	15,71 a	14,2 a
2	8,57	0
3	21,4 a	5,7 b
4	17,1 b	25,7 a
5	14,2 b	30,0 a
6	13,8 a	15,7 a
7	10,0 a	8,7 a

**Tabla 6:** Promedio del tipo de clase discriminadas por RP en los distintos espesores de suelo en Escarificado y No Escarificado. Valores seguidos de letras distintas en sentido horizontal diferencian medias para  $p < 0.05$ .

**Table 6:** Average class type discriminated by penetration resistance in the different soil thicknesses in scarified and non scarified treatments. Values followed by different letters in the line means statistically differences for  $p < 0.05$ .

Espesor (cm)	Escarificado	No Escarificado
	Promedio del tipo de clase	
0-5	1,08 a	1,08 a
5-10	3,12 a	3,97 b
10-15	3,59 a	4,36 b
15-20	3,16 a	4,59 b
20-25	3,83 a	4,67 b
25-30	5,68 a	6,03 a
30-35	6,65 a	6,54 a

Resulta muy importante conocer la distribución espacial de las zonas compactadas, relacionándolas con la productividad edáfica, y el uso del atributo *fuzzy* de un SIG, es un recurso metodológico de análisis de la información obtenida en los perfiles culturales, diferente a los algoritmos matemáticos, que

posibilita un nuevo enfoque para el conocimiento de la respuesta físico-mecánica del suelo a la labor profunda (Montico *et al.*, 2002).

El sistema de siembra directa, ha contribuido a solucionar parte de los problemas de productividad en la región pampeana vinculados al uso agrícola continuo bajo labranza convencional, pero también se la asocia a la generación de compactación por consolidación natural de las partículas y/o tráfico de maquinarias. Esta restricción mecánica puede ser solucionada con una labor profunda capaz de soltar mecánicamente el suelo. También hay resultados divergentes respecto de su incidencia sobre el contenido de humedad edáfica y la producción de materia seca de los cultivos. Para algunas investigaciones el aflojamiento mecánico promueve un mejor uso del agua del suelo con incremento en la producción física, y para otros, los efectos no son significativos. A partir de ello, en un estudio realizado sobre un suelo Argiudol vértico serie Roldán en el sur de Santa Fe se evaluó el efecto de una labor con Paratill en siembra directa sobre el rendimiento y el uso del agua del cultivo de maíz (*Zea mays* L.), en una sucesión agrícola con soja (*Glycine max* L. Merr).

Los resultados obtenidos permiten aseverar que la alta cobertura alcanzada y sostenida en el tiempo por la situación no escarificada controla las pérdidas por evaporación, traduciéndose en un rendimiento en grano y una eficiencia en el uso del agua más alta que la situación bajo labranza profunda **Tabla 7** ☉. Estos resultados sobre rendimiento son contrapuestos a lo informado en otros trabajos para este mismo cultivo sobre directa con paratill (Vilche & Alzugaray, 2008).

**Tabla 7:** Cobertura, rendimiento, consumo y eficiencia del uso de agua (EUA) en siembra directa (SD) y siembra directa escarificada (SDE).

**Table 7:** Soil cover, yield, consumption and efficiency of water use (EUA) in direct drilling (SD) and scarified direct drilling (SDE).

	Cobertura (%)	Rendimiento (kg ha <sup>-1</sup> )	Consumo (mm)	EUA (kg grano mm <sup>-1</sup> )
SD	96,5 a	9619 a	461,7 a	20,8 a
SDE	82,2 b	8380 b	444,5 b	18,8 b

Valores seguidos de letras distintas en sentido vertical diferencian medias para  $p < 0,05$ .  
Values followed by different letters in the column means statistically differences for  $p < 0.05$ .

En el mismo ambiente y suelo, ante las dudas e incertezas surgidas de las investigaciones realizadas sobre la persistencia de las labores profundas en cultivos, más específicamente, escarificado con Paratill, se estudió su efecto sobre el rendimiento y consumo de agua en el cultivo de soja en siembra directa. El escarificado de 1 a 3 años de antigüedad posibilitó comparar la perdurabilidad de la labor **Tabla 8** ☉.

**Tabla 8:** Rendimiento, consumo y eficiencia en el uso del agua (EUA) en las situaciones de diferente antigüedad de labor.

**Table 8:** Performance, consumption and efficiency of water use (USA) in situations of different years from the last work.

Antigüedad de labor	Consumo (mm)	Rendimiento	EUA (kg mm)
P0	308,4 d	3309 d	10,7 b
P3	311,3 b	3636 b	11,6 a
P2	327,4 b	3883 a	11,8 a
P1	355,4 a	3503 c	9,8 c

Letras distintas encolumnadas muestran diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos.  
Values followed by different letters in the column means statistically differences for  $p < 0.05$ .

Se observó que la labor profunda realizada antes de un cultivo de soja incidió significativamente, evidenciando su perdurabilidad a través del aumento del rendimiento, consumo y uso eficiente del agua respecto de la situación sin escarificar (Vilche *et al.*, 2009).

La compactación superficial y subsuperficial de los suelos en la región pampeana argentina está vinculada, principalmente, a la ausencia de remoción, la utilización de maquinaria agrícola gran peso, el tránsito en húmedo, la falta de rotación de cultivos, el alto contenido de limo y el bajo porcentaje de materia orgánica. Como se dijo, el uso de labores mecanizadas mediante escarificadores se presenta como una alternativa viable en el corto plazo para corregir o atenuar los efectos negativos de la compactación. La comparación de diferentes tipos de escarificadores respecto a la presencia de montantes rígidos (versus los flexibles de los arados de cinceles), su disposición en los chasis, el ancho y ángulo de reja, y la distancia entre órganos activos, resulta valiosa para evaluar su efecto en el suelo. Se investigó sobre los efectos que distintos diseños de escarificadores generan sobre las propiedades físicas del suelo a fin optimizar el diseño de diferentes estrategias de uso de los mismos.

En Argiudol típico serie Pergamino se compararon las labores de equipos: a) de montantes rectos (TR) y rejas sin ala, b) de cuatro montantes curvos de lámina plana (TA) y rejas sin ala; c) de cuatro montantes curvos de lámina curva (TC) y rejas sin ala y d) Testigo (T) representado por parcelas sin labor de escarificado. El trabajo de campo halló diferencias importantes en cuanto al efecto sobre algunas propiedades edáficas de los diferentes diseños **Tabla 9** y **10**. Se evaluó el índice de cono y el grado de aflojamiento (GDA) producido por la labor. El GDA se calculó a partir de:  $1 - (RPDT/RPAT) * 100$ , siendo RPDT = resistencia a la penetración después del tratamiento y RPAT = resistencia a la penetración antes del tratamiento.

Los mayores efectos se observaron sobre variables relacionadas al grado de compactación subsuperficial, y pequeñas modificaciones superficiales, siendo el equipo con timón angulado (TA) el de mayor grado de aflojamiento en la zona compactada inicialmente y, además, tuvo los valores más bajos de densidad aparente y de resistencia a la penetración en todo el perfil. Los de TR produjeron el menor disturbio de la cobertura superficial inicial y los TC junto al de TA lograron el mayor efecto sobre la densidad aparente hasta los 30 cm de profundidad (Elisei *et al.*, 2012).

Son varias las alternativas que se proponen en los planteos integrados agrícolas ganaderos orientadas a optimizarlos, una de ellas es la introducción de cultivos de cobertura (CC) que se destinen al pastoreo directo de animales entre cultivos de soja. Entre las modificaciones que se producen en el perfil del suelo como consecuencia de este planteo, la manifestación de la compactación es una de los interrogantes más frecuentes, principalmente por el tránsito de los animales. En un trabajo de investigación de varios años, el primero de ellos, en un suelo Argiudol vértico se evaluó la compactación producida en luego del pastoreo del CC de raigrás con diferentes intensidades a través de la resistencia a la penetración en el espesor 0-30 cm. Se corroboró la hipótesis de que a mayor carga, mayor es la tendencia a la compactación, detectándose también al primer año de pastoreo modificaciones en la densidad aparente, siendo mayor en la situación de más alta intensidad (Bonel *et al.*, 2013).

En este mismo experimento, luego de tres años de secuencia ininterrumpida, se abordó la evaluación de la resistencia (RT) y de la resiliencia (RL) del sistema integrado propuesto, mediante tres atributos edáficos. Una de ellos, la compactación, a través del índice de cono (IC). Si se considera la RL más importante que la RT para evaluar las respuestas de los sistemas a las perturbaciones que pueden alterar sus estructuras y funciones, resulta acertado establecer una relación entre esta capacidad y las



modificaciones que tuvieron las variables edáficas por el tipo de manejo implementado. Así entonces, la introducción de un CC y su pastoreo previo al cultivo de soja, respecto a la compactación, tuvo una tendencia a la evolución favorable, en cuanto disminuyó la RT y la RL (Montico *et al.*, 2016).

**Tabla 9:** Índice de cono y grado de aflojamiento (GDA) correspondiente a los tratamientos: Testigo (T), Timón Recto (TR), Timón Curvo (TC) y Timón Angulado (TA).

**Table 9:** Cone index and degree of loosening (GDA) corresponding to the treatments: Control (T), Rudder (TR), Curved Rudder (TC) and Angled Rudder (TA).

Prof. (cm)	Índice Cono (kPa)				GDA (%)		
	T	TA	TC	TR	TA	TC	TR
0	261 b <sup>1</sup>	25 a	31 a	37 a	92	88	86
2,5	637 b	70 a	98 a	101 a	89	86	81
5,0	1173 b	264 a	213 a	291 a	76	82	72
7,5	1656 b	413 a	377 a	561 a	74	77	64
10,0	1846 b	523 a	546 a	755 a	71	70	58
12,5	1811 b	601a	702 a	917 a	67	61	48
15,0	1901 c	633 a	822 ab	945 b	66	57	50
17,5	2109 c	577 a	863 b	911b	72 b	59 a	56 a
20,0	2133 b	633 a	963 a	861 a	69 b	54 a	58 ab
22,5	1873 b	778 a	1125 b	828 b	57 b	39 a	54 ab
25,0	1659 c	840 a	1266 bc	906 ab	48	22	43
27,5	1544 b	837 a	1261 b	899 a	44	15	40
30,0	1550 c	884 a	1244 bc	934 ab	41	16	38
32,5	1647 b	987 a	1268 ab	1066 a	38	18	34
35,0	1729 b	1108 a	1396 ab	1351 a	34	16	21
37,5	1858 b	1265 a	1577 ab	1589 ab	30	13	14
40,0	1954 b	1461 a	1718 ab	1795 ab	24	10	8
42,5	2055	1612	1855	1886	20	8	8
45,0	2189	1780	1987	1944	18	8	11

Letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0,1$ ) entre tratamientos dentro de cada fila (Duncan).


Values followed by different letters in same line means statistically differences for  $p < 0.1$  (Duncan).

**Tabla 10:** Densidad aparente (DA) y Porosidad Total (PT) en los tratamientos Testigo (T), Timón Recto (TR), Timón Curvo (TC) y Timón Angulado (TA) en los diferentes espesores.

**Table 10:** Bulk density (DA) and Total porosity (PT) in the different treatments. Control (T), Rudder Straight (TR), Curved Rudder (TC) and Angled Rudder (TA) in the different soil layers.

Tratamientos	5-10 cm		10-20 cm		20-30 cm		30-40 cm	
	DA	PT	DA	PT	DA	PT	DA	PT
	g cm <sup>-1</sup>	%	g cm <sup>-1</sup>	%	g cm <sup>-1</sup>	%	g cm <sup>-1</sup>	%
TC	1,22 a <sup>1</sup>	54 b	1,24 ab	53 ab	1,25 a	53 b	1,41	47
TR	1,31 b	51 a	1,30 b	51 a	1,37 b	48 a	1,42	46
TA	1,22 a	54 b	1,20 a	55 b	1,29 a	51 b	1,41	47
T	1,34 b	49 a	1,34 b	50 a	1,39 b	47 a	1,44	46
CV (%)	3,32	3,08	8,18	6,03	5,84	5,12	3,76	4,3

<sup>(1)</sup>letras diferentes indican diferencias significativas ( $p < 0.1$ ), dentro de cada columna (Duncan).

También en este diseño experimental, en 2017, luego de cinco ciclos consecutivos de CC (pastoreado con distintas intensidades)-soja, se estudió el vínculo entre la compactación (IC), la calidad de la estructura (CE) y el patrón de agrietamiento (A) de los espesores superficiales de suelo, en búsqueda de una caracterización del impacto de esta estrategia de manejo sobre su estado físico-mecánico. Respecto a la CE de cada capa, ésta fue evaluada según: 1 a 2, buena; 2 a 3, regular; 3 a 5, mala. La investigación muestra que pastorear el CC con baja intensidad tiene menor IC y mejor CE **Tabla 11** . Asimismo, el patrón de grietas en el perfil de suelo estudiado en estas mismas intensidades son las que mejorarían el flujo de agua y de aire.


**Tabla 11:** Valores de calidad estructural (CE) e índice de cono (IC) de los tratamientos.

**Table 11:** Values of structural quality (CE) and cone index (CI) in different treatments.

Tratamiento	CE	IC (kPa)
IB	2,11 b	1475 b
IMB	2,56 a	1686 b
IMA	2,72 a	1803 a
IA	2,85 a	1882 a
Tsr	2,88 a	1996 a
T	2,69 a	1811 a

Soja-Soja (Tsr), Soja-CC-Soja (T), IB (intensidad baja), IMB (intensidad media baja), IMA (intensidad media alta) y IA (intensidad alta)  
 Letras diferentes implican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos.

Different letters means significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments.

Respecto al impacto en los estratos superiores de distintos tipos de uso de suelos, las diferentes secuencias de cultivos y los sistemas de labranza, alteran la condición mecánica y con ello se modifica su calidad, esencialmente, la capacidad que posee para funcionar. Existe una creciente preocupación por caracterizar la compactación superficial edáfica en planteos productivos en siembra directa como apoyo para tomar las mejores decisiones de manejo tecnológico, más, en los actuales en planteos de agricultura de precisión. Además, cuando el cultivo de soja participa de la secuencia agrícola surgen dudas respecto a sus efectos sobre la condición físico-mecánica. Para investigar esta influencia se realizó un test de campo. En el mismo se determinó el índice de cono (IC) en el espesor 0-5 cm, en trincheras de 50 cm de longitud de un suelo Argiudol vértico serie Roldán. Se evaluaron situaciones donde el cultivo de soja tuvo diferentes antecesores: cebada, soja, raigrás como cultivo de cobertura y maíz, y se lo comparó con situaciones no agrícolas: pastura de alfalfa y festuca y el monte. Con la utilización de un penetrómetro de mano se determinó el IC frontal y superficial **Tabla 12** . El IC fue corregido a 18% de humedad en todas las situaciones. Además de la distinta sensibilidad para detectar diferencias entre la medición frontal o superficial, esta evaluación no encontró asociaciones de interés respecto del vínculo antecesor-soja y compactación superficial (Berardi & Montico, 2015).

**Tabla 12:** Índice de cono (IC) frontal y superficial en las diferentes situaciones de antecesores a soja.

**Table 12:** Frontal and superficial cone index (IC) in the different situations of soybean previous crop.

Situación	IC frontal (MPa)	IC superficial (MPa)
Cebada	0,99 b	0,88 a
Soja	0,86 b	0,91 b
Maíz	0,93 b	1,06 a
CC Raigrás	0,85 b	0,80 c
Parque	0,84 b	0,76 c
Pastura	1,40 a	0,92 b

Letras distintas encolumnadas muestran diferencias significativas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos.  
 Different letters in each column means significant differences ( $p < 0.05$ ) between treatments

## ■ VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CONDICIÓN MECÁNICA

Las propiedades o atributos del suelo suelen presentar un alto grado de variabilidad espacial, tanto en la dimensión horizontal como en la vertical, debido a la combinación de procesos físicos, químicos, biológicos o climáticos que operan a diferentes escalas (Goovaerts, 1999; Santra *et al.*, 2008; Bravo & Andreu, 2011). La cuantificación e interpretación de esta variabilidad espacial es un tema clave para el Manejo Sitio Específico (MSE), y/o para las tecnologías vinculadas a lo que se conoce como Agricultura de Precisión (AdP) (Brouder *et al.*, 2001). En efecto, la producción física de los cultivos fluctúa dentro de los lotes, como consecuencia de la variación que presentan las propiedades del suelo (Godwin & Miller, 2003), y la topografía (Kravchenko *et al.*, 2005), entre otros. Tanto la magnitud como la estructura espacial de la variabilidad dentro del lote son aspectos necesarios para la aplicación del MSE (Pierce & Nowak, 1999).

La compactación del suelo está reconocida como uno de los mayores problemas que afectan a la producción agrícola, y su impacto en los sistemas de producción ha sido profusamente detallado por Soane & Van Ouwerkerk (1993). Es una problemática en la cual hay muchos procesos interactivos e interdependientes en los vínculos entre el mismo suelo, las raíces de los cultivos, las maquinarias y otros aspectos ambientales (Horn *et al.*, 1995; Botta *et al.*, 2010).

La variabilidad espacial de la compactación edáfica tiene estrecha relación con las propias características que la condicionan y/o determinan. Toda variación espacial en los parámetros texturales, en el contenido de la materia orgánica, en la incidencia de los procesos erosivos, o en la historia del uso y manejo del suelo, serán los causales de la variabilidad en la expresión de la compactación de los suelos.

El suelo es un medio tridimensional y multifuncional que evidencia cambios en la variabilidad espacial de sus propiedades. Las que se manifiestan en sentido horizontal generalmente muestran dependencia espacial. Esto implica que las muestras cercanas entre sí tienen propiedades más semejantes a las de las muestras más alejadas entre sí (Webster & Oliver, 2001). Las que se manifiestan en sentido vertical son reconocidas a través del perfil edáfico (sucesión de horizontes genéticos) y del perfil cultural (sucesión de ambientes diferenciados a partir de acciones antrópicas). En este sentido, resulta útil la caracterización del anisotropismo, que es el grado de diferenciación espacial en dirección vertical que puede distinguirse en el perfil debido a las variaciones de las propiedades edáficas (Castrignano *et al.*, 2002; Montico *et al.*, 2012).

La geoestadística ha sido la principal herramienta metodológica para implementar la AdP utilizando datos de campo recopilados a diferentes resoluciones espaciales (Webster, 2008). Debido a la interacción entre la variabilidad natural y las prácticas antrópicas la estructura espacial de las propiedades de suelos es específica de cada lote (Mallarino, 1996), lo cual hace dificultosa la formulación de soluciones o esquemas metodológicos que sean aplicables de manera generalizada.


En muchos trabajos científico-técnicos se ha empleado la geoestadística para comparar la variabilidad espacial en, y entre las diferentes propiedades del suelo, a los efectos de descubrir relaciones de correspondencia entre algunas de ellas. En varios de trabajos se ha incluido a la compactación como una de las variables a considerar en el análisis (Kılıç *et al.*, 2004; Veronesi *et al.*, 2012; Alesso *et al.*, 2017).

La compactación de los suelos puede ser evaluada a través de la medida de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) (Utset & Cid, 2001; Tekeste *et al.*, 2005), y/o la densidad aparente (Hakanson

& Lipiec, 2000), las cuales son herramientas sencillas (sobre todo la primera), para detectar los cambios en el perfil que pueden relacionarse con la dificultad en la exploración de las raíces por compactación. Por otra parte, y como ya se mencionó, las técnicas geoestadísticas permiten evaluar la dependencia espacial que tenga esta variable en el área evaluada y a la profundidad definida, bajo las condiciones del terreno presentes al momento del muestreo.

En una prueba realizada sobre un Argiudol típico serie Peyrano del sur de Santa Fe, se intentó caracterizar la variabilidad espacial del rendimiento de soja y su relación con la resistencia mecánica a la penetración (RMP) y la conductividad eléctrica aparente (CEa) (Di Leo *et al.*, 2013).

En un sector de un lote de la zona de Zavalla (33°00'23,1"S; 60°56'38,2"O), (de 36 ha de superficie y con un 0,82% de pendiente), se establecieron 114 puntos de muestreo distribuidos en una grilla regular para la variable RMP (kPa), la cual fue medida por un penetrómetro Fieldsout SC-900 en el estrato 0-32,5 cm, se tomaron 5 datos al azar en derredor de cada punto de la grilla, los cuales fueron promediados y ajustados al 18 por ciento de humedad de suelo. La CEa (miliSie/m) se midió con el Veris 3100 para el estrato 0-90 cm. Luego del filtrado de datos erróneos y/o de valores fuera de tipo, se empleó el mapa de rendimiento del cultivo de soja de la campaña 2011/2012.

Mediante estadística descriptiva y análisis geoestadístico se verificó la dependencia espacial y las correlaciones entre el rendimiento de soja y las variables edáficas relevadas. Ambas variables presentaron distribución normal. La RMP mostró mayor variación espacial en el lote respecto a CEa **Tabla 13** .

**Tabla 13:** Estadísticos descriptivos de las variables de suelo y de los rendimientos de soja.

**Table 13:** Descriptive statistics of soil variables and soybean yields.

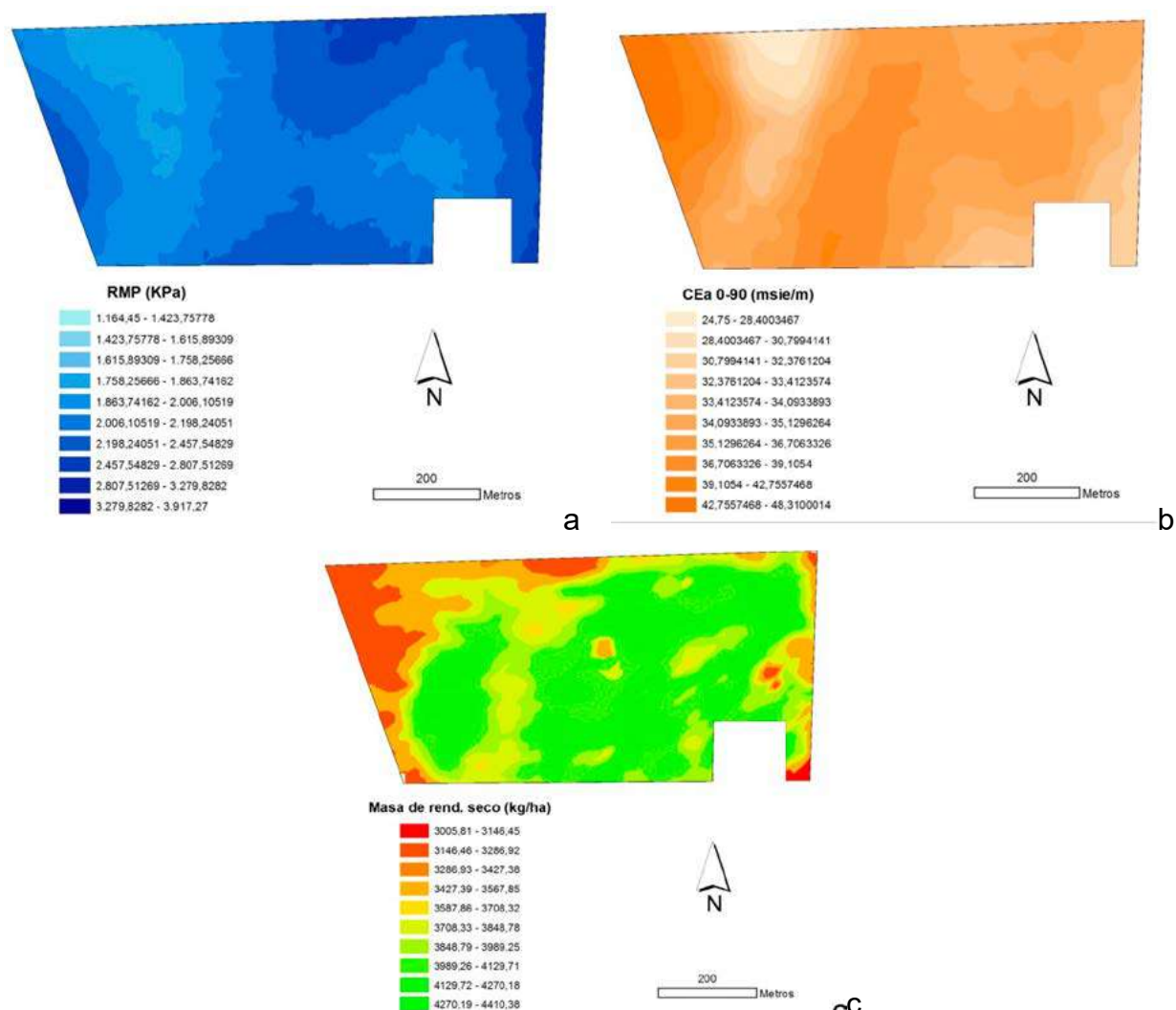
Variable	Media	D.E.	CV	Min	Max	Mediana	Coef. de asimetría	Curtosis
Soja 2011-12	3877,18	321,35	8,29	3005,81	4410,38	3933,04	-0,45	-0,64
RMP (Kpa)	2224,31	610,16	27,43	1164,45	3917,27	2092,64	0,54	-0,46
Cea (msie/m)	35,47	3,01	8,49	24,75	48,31	35,11	0,82	2,87

RMP y CEa ajustaron a modelos de semivariogramas esféricos y ninguna presentó efecto pepita puro. La correlación entre el rendimiento de soja y la RMP fue significativa ( $p < 0,05$ ), lineal y negativa ( $r = -0,457$ ), mientras que con la CEa la correlación fue no significativa. Las áreas de mayor rendimiento de soja concordaron con sectores de menor RMP (Fig. 6a y 6c), y esa relación no resultó clara respecto a CEa (Fig. 6b).

Se concluyó que la medición de la RMP permitió caracterizar la variabilidad espacial intralote de un Argiudol típico y fue posible establecer su relación con el cultivo de soja, siendo necesario profundizar en el estudio del comportamiento de la CEa y su vínculo con otras variables edáficas, a efectos de optimizar la determinación de ambientes diferenciales a nivel intralote.

Teniendo en cuenta que el suelo es un medio tridimensional y multifuncional que evidencia cambios en la variabilidad espacial de sus propiedades, respecto de la compactación resulta útil la caracterización del anisotropismo, que es el grado de diferenciación espacial en dirección vertical que puede distinguirse en el perfil debido a las variaciones de las propiedades edáficas.

En un estudio realizado sobre un Argiudol vértico serie Roldán, se buscó establecer la variabilidad espacial de la resistencia mecánica a la penetración (RMP) a distintas profundidades de muestreo, a efectos de evaluar la anisotropía del suelo a nivel intralote (Di Leo *et al.*, 2016a).



**Figura 6:** Distribución espacial de las variables RMP (a) y CEa (b), y del rendimiento de la soja (c). RPM: resistencia mecánica a la penetración y CEa: conductividad eléctrica aparente.

**Figure 6:** Spatial distribution RMP (a; soil penetration resistance) and CEa (b, electrical conductivity) and yield of soybean (c)

El estudio se llevó cabo en un lote de 17,8 ha, en la localidad de Zavalla, Santa Fe (33°01'34,2"S; 60°53'59,7"W), con 0,82% de pendiente y cuyo uso es agrícola bajo siembra directa con una rotación Sj-Tr/Sj-Tr/Mz. Se establecieron 106 puntos de muestreo distribuidos en una grilla regular. Las lecturas de RMP se tomaron desde superficie hasta los 30 cm de profundidad en intervalos cada 5 cm, mediante el promedio de 5 lecturas al azar en derredor de cada punto de la grilla. El promedio de las medidas de la RMP, dentro de un rango prefijado de profundidades, recibe el nombre de índice de cono. Se expresa en unidades de presión que surgen de dividir el esfuerzo para introducir el cono en el suelo por la superficie de la base del cono usado. Los valores obtenidos fueron transformados en Mega Pascales (MPa) y ajustados según la humedad determinada en el momento del muestreo por gravimetría.

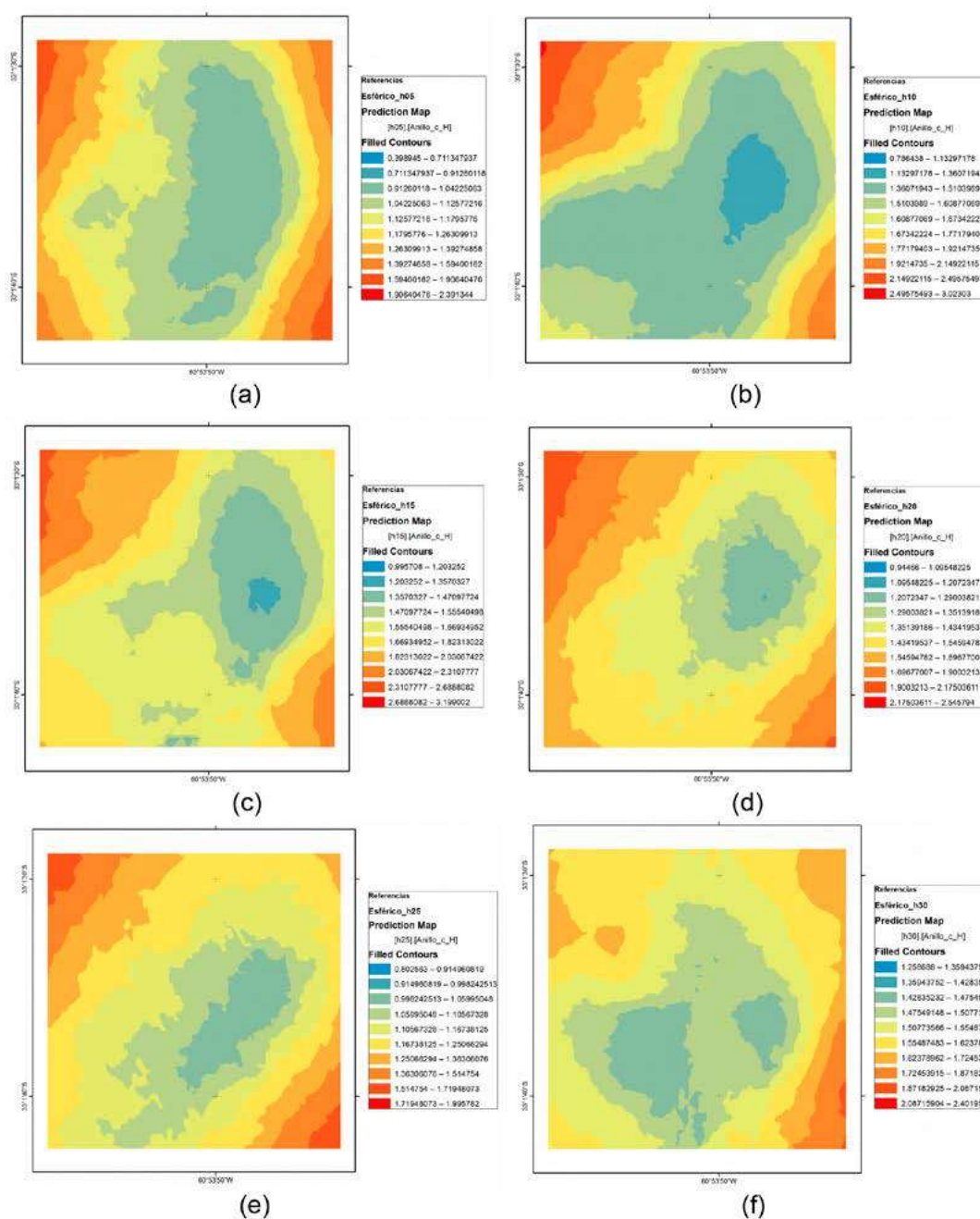
Mediante estadística descriptiva y análisis geoestadístico se verificó la dependencia espacial de los muestreos realizados en los seis rangos de profundidad. En la totalidad de los muestreos, los semivariogramas experimentales ajustaron a modelos de semivariogramas teóricos de tipo esférico. En la **Tabla 14** se muestran los errores predictivos de los modelos calculados para cada profundidad de muestreo. En la **Figura 7** se pueden observar los mapas de RMP según cada profundidad de muestreo.



**Tabla 14:** Errores de predicción en los modelos predictivos según profundidad. ME: error medio. RMSE: error cuadrático medio. RMSSE: Error cuadrático medio estandarizado.

**Table 14:** Prediction errors in predictive models according to depth. ME: medium error. RMSE: mean square error. RMSSE: standardized quadratic mean error.

Profundidad (cm)	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25	25-30
ME	-0,00316	-0,00019	-0,00074	-0,00036	-0,00136	0,00086
RMSE	0,30599	0,33765	0,35563	0,29850	0,20648	0,15724
RMSSE	1,11280	1,14846	1,07265	1,08613	1,02787	1,02707



**Figura 7:** Mapas de RMP según profundidades de muestreo. (a) 0-5 cm, (b) 5-10 cm, (c) 10-15 cm, (d) 15-20 cm, (e) 20-25 cm y (f) 25-30 cm.

**Figure 7:** RMP (soil penetration resistance) maps according to sampling depths. (a) 0-5 cm, (b) 5-10 cm, (c) 10-15 cm, (d) 15-20 cm, (e) 20-25 cm and (f) 25-30 cm.


De la observación de los mapas de RMP según las profundidades de muestreo, se advierte el grado de anisotropismo espacial a nivel intralote que puede ser evaluado mediante esta metodología, la cual resulta útil para apoyar la toma de decisiones en cuanto al MSE del mismo, entre otras.


Indicadores de riesgo de compactación, o atributos edáficos relacionados con ésta, pueden ser el contenido de materia orgánica en el suelo (MOS), o la estabilidad de la estructura (EE). Sus variaciones espaciales a nivel intralote pueden indicar otros aspectos vinculados a la condición mecánica en general.

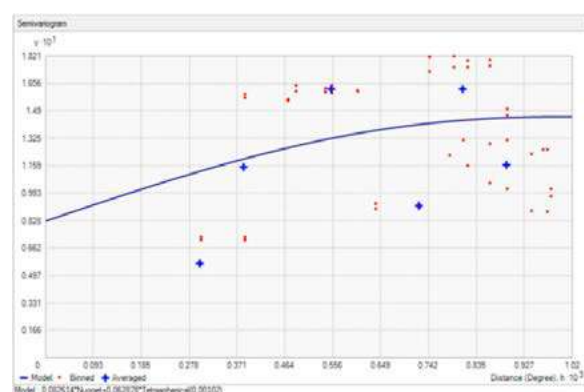
La EE se define como la capacidad de un suelo a conservar su arreglo de partículas sólidas y poros cuando está sometido a diferentes tipos de estrés, siendo los naturales principalmente la acción disruptiva del agua y la erosión, y los antrópicos el impacto de las herramientas de trabajo y las rodaduras de los vehículos en el suelo, entre otras.

Con fines exploratorios, se caracterizó la variabilidad espacial en la determinación de la EE con pretratamiento agua (Di Leo *et al.*, 2016b), siguiendo la metodología de determinación de EE de Henin *et al.* (1972). El pretratamiento con agua permite evaluar la presencia de macroporos, ya que si al sumergir los agregados en agua no hay macroporos suficientes como para dar lugar a la salida del aire atrapado, se produce el estallido.

En un Argiudol vértico serie Roldán bajo siembra directa (idem Di Leo *et al.*, 2016a), se establecieron 106 puntos de muestreo distribuidos en una grilla regular. En cada punto de muestreo se tomaron 3 submuestras extraídas con pala hasta los 20 cm de profundidad. Para cada muestra se procedió a calcular el porcentaje de agregados estables mediante el método de Henin *et al.* (1972), con el pretratamiento citado. Los resultados fueron evaluados mediante análisis estadístico descriptivo y técnicas geostatísticas. Se caracterizaron los parámetros de los semivariogramas teóricos con mejor ajuste (pepita, meseta y rango), y la razón de dependencia espacial (RDE) de las variables en función de la proporción de la varianza estructural.

En el análisis exploratorio, los valores de asimetría y curtosis indicaron una distribución no normal, por lo que se aplicó una transformación logarítmica. La media de agregados estables de todas las muestras extraídas del lote fue del 15,36%. La variabilidad espacial de la EE con pretratamiento agua se ajustó satisfactoriamente a un modelo de semivariograma teórico de tipo tetraesférico **Figura 8** .

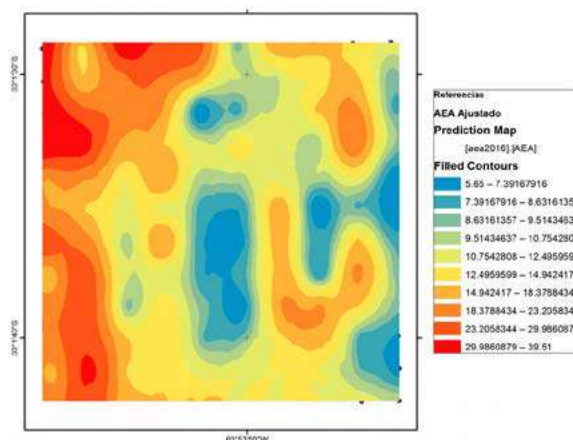
El error cuadrático medio del modelo obtenido fue alto (5,38), mientras que el error medio estandarizado fue de 1,08. Esto sugiere que, a la escala de muestreo, la EE con pretratamiento al agua presenta una correlación espacial débilmente asociada al semivariograma teórico antedicho. El error cuadrático medio estandarizado arrojó un valor de 1,0806; lo que indica que el modelo predictivo encontrado subestima la variabilidad del conjunto de datos. El resultado del cálculo de la RDE fue de 64%. Este valor indica que la EE con pretratamiento agua presenta una mediana dependencia espacial. En la **Figura 9**  se muestra el mapa de la variable estudiada logrado a partir de las predicciones del modelo teórico



**Figura 8:** Semivariograma de la variable espacial EE (estabilidad estructural) con pretratamiento agua.

**Figure 8:** Semivariogram of the spatial variable EE (structural stability) with water pretreatment.

ajustado seleccionado. El mismo no posee altos grados de similitud con los de resistencia mecánica a la penetración (RMP) logrados en Di Leo *et al.* (2016a).



**Figura 9:** Distribución espacial de la variable EE (estabilidad estructural) con pretratamiento agua.

**Figure 9:** Spatial distribution of the variable EE (structural stability with water pretreatment).

Se concluyó que la medición de la EE con pretratamiento agua permitió caracterizar la variabilidad espacial a nivel intralote de esta propiedad física en un Argiudol vértico, aunque se debiera testear con intensidades de muestreo mayores a efectos de encontrar modelos predictivos más robustos. El elevado efecto pepita indica una alta variación en los datos, no relacionada con la distribución espacial, lo cual ha sido reconocido en otros estudios, y que estaría marcando la necesidad de ajustar la metodología analítica a nivel de laboratorio.

Similares determinaciones fueron realizadas por Saperdi *et al.* (2014) en donde se compararon los comportamientos espaciales de la EE según pretratamientos agua y etanol. Sobre un suelo Argiudol vértico, serie Roldán, de un lote de 18,2 ha ubicado en la localidad de Zavalla, Santa Fe (33°01'34,2"S; 60°53'59,7"W), pero con una grilla regular de 105 puntos de muestreo (ídem Montico *et al.*, 2014). La RDE obtenida fue de 54 por ciento (también mediana), desde un semivariograma de tipo esférico ( $R^2 = 98\%$ ). En este trabajo, el porcentaje de agregados estables es mayor en el método con pretratamiento etanol, respecto de Di Leo *et al.* (2016b), debido a las características del mismo, ya que posibilita una humectación más lenta y por lo tanto un menor estallido de agregados en comparación con el pretratamiento con agua.

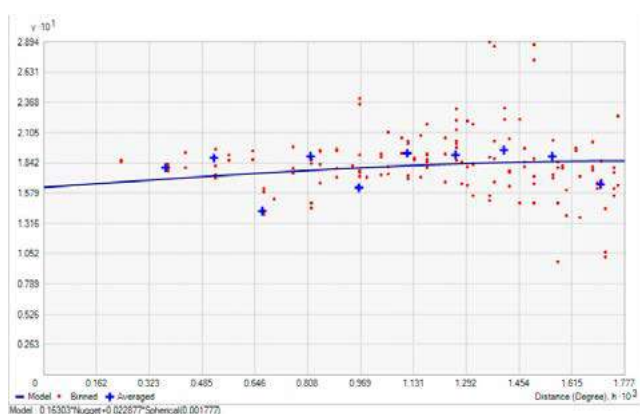
Respecto de la distribución espacial del contenido de materia orgánica (MOS), se procedió al estudio de esta variable en similares condiciones que para la EE (Di Leo *et al.*, 2016c). Sobre el mismo lote, y empleando la grilla regular con 106 puntos muestrales, en cada uno se tomaron tres submuestras al azar extraídas con barreno hasta los 20 cm de profundidad. La determinación analítica del carbono orgánico del suelo (COS) se realizó mediante el método Walkley-Black modificado. El contenido de MOS se derivó a partir del COS multiplicando a éste por 1,724.

La media de MOS de todas las muestras tomadas fue de 3,06%. Los valores de asimetría y curtosis indicaron una distribución cuasi-normal. Las Figuras 10 y 11 muestran el semivariograma y el mapa de MOS obtenidos. La variabilidad espacial se ajustó mejor a un modelo de semivariograma teórico de tipo esférico. El error cuadrático medio del modelo obtenido fue bajo (0,435), mientras que el error medio estandarizado fue de 0,00363. Esto sugiere que, a la escala de muestreo, la MOS presen-



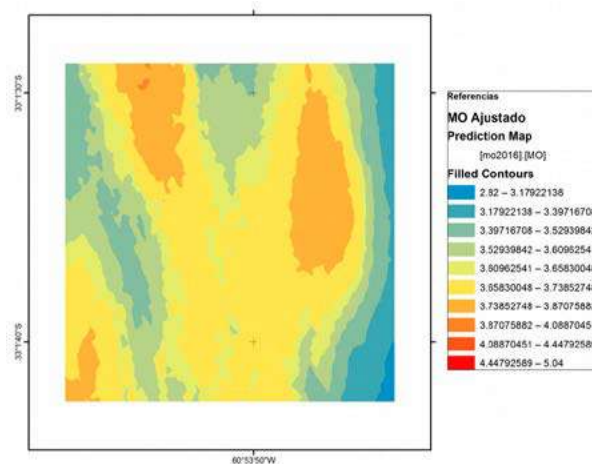
ta correlación espacial, con fuerte asociación al semivariograma teórico antedicho. El error cuadrático medio estandarizado arrojó un valor de 1,0168; lo que indica que el modelo predictivo representa ajustadamente la variabilidad del conjunto de datos. El resultado del cálculo de la RDE fue del 87,7%, lo que indica que la MOS presenta una débil dependencia espacial.

Estos resultados indican que la intensidad de muestreo de la MOS fue la adecuada. Sin embargo, el elevado efecto pepita indica una alta variación en los datos, no relacionada con la distribución espacial, MSE reconocido en otros estudios, y que estaría marcando la necesidad de ajustar la metodología analítica a nivel de laboratorio.



**Figura 10:** Semivariograma de la variable espacial MOS (materia orgánica del suelo).

**Figure 10:** Semivariogram of the spatial variable MOS (soil organic matter).



**Figura 11:** Distribución espacial de la variable MOS (materia orgánica del suelo).

**Figure 11:** Spatial distribution of the MOS variable (soil organic matter).

En términos generales, es ampliamente reconocido que la calidad estructural del suelo está estrechamente vinculada con la condición mecánica. Es decir que la compactación conspira contra aquel atributo, disminuyendo la funcionalidad edáfica y alterando el edafosistema (Hakansson & Lipiec, 2000). Por otra parte y a nivel de diagnóstico, resulta evidente la importancia de la caracterización superficial de los suelos para evaluar su calidad, considerando la estructura y las condiciones mecánicas (Cotching & Kidd, 2010).

En un estudio abarcativo de las condiciones edáficas de superficie (Montico *et al.*, 2014), se estudió el comportamiento espacial de tres variables vinculadas a este concepto. El objetivo fue entonces conocer la distribución espacial de la calidad estructural, densidad aparente y espesor superficial de un suelo, como recurso para la gestión agronómica sustentable de situaciones de manejo.

En el lote se establecieron 105 puntos de muestreo distribuidos en una grilla regular de 40 m. En cada punto se realizó a campo la calificación visual de la calidad estructural (Cvc), la densidad aparente (Dap) (0-20 cm) y se midió el espesor de los horizontes superficiales (A+B1) hasta el inicio del horizonte B21t.



Para la calificación visual a campo de la estructura (Cvc) se extrajeron a pala bloques de 20 cm de largo x 20 cm de ancho y 15 cm de espesor. Posteriormente se colocaron en una bandeja y se utilizó la guía de calificación desarrollada por Ball *et al.* (2007). Se separaron las unidades estructurales de los bloques a través de sus líneas de corte o cizallamiento natural con el propósito de identificar capas

diferenciadas por las forma, tamaño y dureza de los agregados y por la distribución de las raíces. Cada capa fue evaluada según una escala, donde el número 1 corresponde a la mejor calidad estructural y el número 5 a la peor. Con los valores de cada capa se obtuvo el Cvc en cada punto. Al lado de la determinación de la Cvc se procedió a extraer muestras ( $n=3$ ) para obtener la densidad aparente por medio del método del cilindro (Blake & Hartge, 1986). En cada punto se determinó el espesor conjunto de los horizontes A+B1, considerando como plano de referencia el límite superior, abrupto y suave, del horizonte B21t ( $n=4$ ). La medición se efectuó con un dispositivo que posibilita medir ese espesor con una regla dispuesta paralelamente a la superficie del suelo y perpendicularmente al límite mencionado.

Los análisis espaciales incluyeron el ajuste de los variogramas observados a modelos de semivariogramas teóricos de tipo lineal, esférico, gaussiano y exponencial. La interpolación se realizó a través de kriging ordinario y validación de las estimaciones mediante validación cruzada empleando el software ArcView 3.2, junto con el script Kriging Interpolator 3.2 (Boeringa, 2005). Se caracterizaron los parámetros de los ajustes a los semivariogramas (pepita, meseta y rango) y la razón de dependencia espacial (RDE) de las variables en función de la proporción de la varianza estructural según Cambardella *et al* (1994), a partir de los cuales se seleccionó la combinación de parámetros geoestadísticos que presentó el mayor valor de  $r^2$  en la validación cruzada entre los datos observados y los estimados por kriging.

Del análisis global de los datos obtenidos, se advierte que el mayor espesor medido está incrementado 35,13 % respecto a la media y el menor, disminuido 32,21 %, ambos aproximadamente, 7 cm. Esta situación resulta particularmente relevante cuando se pretende fijar las condiciones de muestreo. Ante el intento de realizar el muestreo, que habitualmente es recomendado para espesores superficiales de 0-20 cm (o fraccionado en espesores menores), se estará incorporando capas de suelo muy diferentes. En este caso el 58 % ( $n=61$ ) de los valores se desvían en más o en menos, un 20 % ( $\leq 4$  cm), el 36,1 % ( $n=38$ ) lo hacen entre 20 % y 40 % ( $>4$  cm y  $<8$  cm), y el 5,9 % ( $n=6$ ) superan el 40 % ( $\geq 8$  cm). Las posibles causas de las variaciones locales pueden ser la erosión hídrica, la compactación por tránsito y degradación biofísica. Esos cambios de espesor, tal como asegura Rossiter (2000), pueden introducir importantes errores al momento de interpretar la información obtenida.

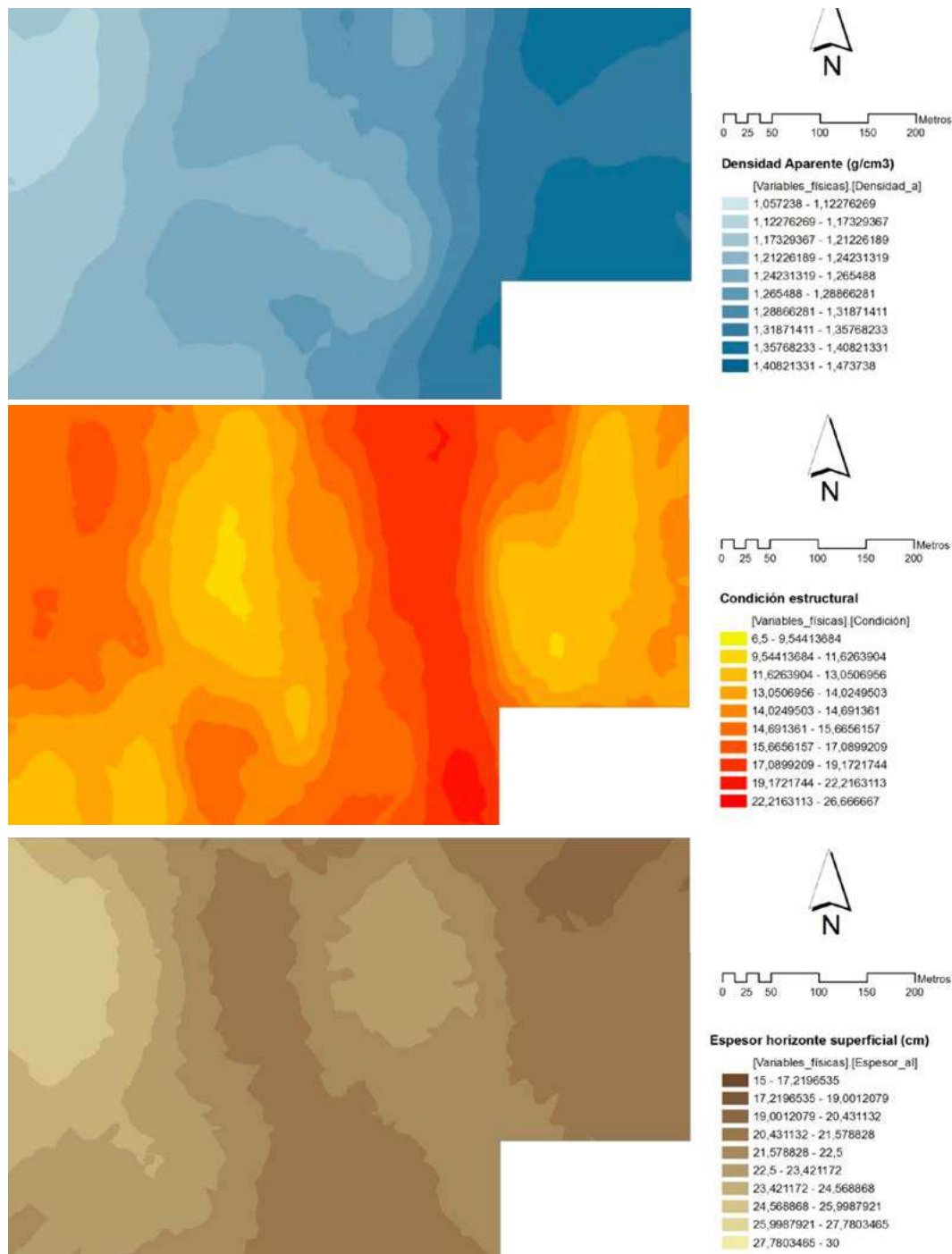
Si bien la media de los valores de Dap ( $1,23 \text{ g cm}^{-3}$ ) indicaría condiciones mecánicas no restrictivas para el desarrollo de los cultivos (Stirzaker *et al.*, 1996), el 64,8% ( $n=68$ ) de los puntos evaluados se encuentran sobre este valor y el 38,1% ( $n=40$ ) entre  $1,30$  y  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ . Respecto a la Cvc, el 64,7% ( $n=68$ ) de los puntos tuvieron valores entre 1 y 2, 29,5% ( $n=31$ ) entre 2 y 3, y 5,7% ( $n=6$ ) superaron 3. De acuerdo a los rangos de calidad establecidos por Ball *et al* (2007), en más de la tercera parte de la superficie del lote no fue necesario emprender tareas de mejora de la condición estructural, siendo necesario hacerlo en el resto del lote y ameritando profundizar los estudios asociados a esta propiedad edáfica. Las prácticas tecnológicas recomendadas para esta situación están vinculadas con la gestión de manejo de las rotaciones, la cobertura, los residuos, la labranza, el tránsito de maquinarias y el control de la erosión hídrica.

La distribución espacial de las propiedades evaluadas se observan en la **Figura 12**  y en la **Tabla 15** , se presentan los descriptivos estadísticos.

La variable Dap ajustó a un modelo de semivariograma teórico de tipo esférico, con un  $r^2 = 97,0\%$ ; Cvc ajustó a un modelo de semivariograma teórico de tipo exponencial con un  $r^2 = 97,6\%$ ; y la variable A+B1 ajustó a un semivariograma de tipo esférico con  $r^2 = 97,0\%$ . La correlación de la Dap fue significa-

tiva (Test-T: 431,7) y lineal negativa con el espesor A+B1 ( $r = -0,76$ ;  $r^2 = 58,07\%$ ) y con la Cvc ( $r = -0,06$ ;  $r^2 = 0,34\%$ ; Test-T: -21,4), mientras entre el espesor A+B1 y la Cvc resultó significativa (Test-T: 96,4) y lineal y positiva ( $r = 0,27$ ;  $r^2 = 6,49\%$ ).

A partir de los resultados de este estudio, es posible determinar que existe una asociación negativa entre Dap y A+B1. Aun con las bajas correlaciones espaciales entre variables, es posible aventurar que los sitios con mayor compactación (mayor Dap) poseen menor calidad estructural (Cvc), y aquellos donde el espesor aumenta, mejora la calidad de la estructura.



**Figura 12:** Distribución espacial de las variables analizadas.

**Figure 12:** Spatial distribution of the analyzed variables.

**Tabla 15:** Estadísticos descriptivos y RDE de las variables edáficas evaluadas**Table 15:** Descriptive statistics and RDE of the edaphic variables evaluated.

Variable	Media	D.E.	CV	Min	Max	Mediana	Coef. de asimetría	Curtosis	RDE (%)
CVc	1,84	0,60	32,61	1,12	3,5	1,73	0,36605	3,0892	44,45
Dap (g cm <sup>-3</sup> )	1,23	0,18	14,63	1,06	1,45	1,26	0,01751	2,6061	52,84
A+B1 (cm)	22,2	3,10	13,96	15,0	30,0	22,0	0,33550	2,933	35,02

## ■ CONCLUSIONES

La condición mecánica del suelo es uno de los atributos edáficos que más influye en la productividad de los sistemas agrícolas, ganaderos y en los integrados. Posee rasgos y características que son propias de estados no lineales y complejos, y que requieren de estudios detallados para comprender su real y efectiva incidencia en los procesos y funciones del suelo.

La compactación es la expresión físico mecánica que obra como una limitante de variada incidencia en la producción física de cultivos y pasturas, y los importantes y recurrentes esfuerzos realizados por los diferentes equipos de trabajo de investigación y experimentación, han aportado nuevos y mayores conocimientos a su estudio. No obstante, es necesario continuar ampliando y profundizando la generación de conocimiento sobre procesos naturales inductores de la alteración de la condición mecánica de los suelos, como de aquellos vinculados a la implementación de prácticas tecnológicas.

Magnitudes, escalas, espacialización, severidades, y hasta su correlación con variables de tipo económica, deberán seguir siendo objetivos donde focalizar las actividades investigativas.

El desarrollo de modelos determinísticos y estocásticos capaces a explicar la construcción del proceso de compactación en diferentes ambientes y su evolución temporal, puede aportar al reconocimiento de casuísticas, al momento poco exploradas.

Asimismo, la búsqueda y confirmación de respuestas a técnicas agronómicas (labranzas, rotaciones, cultivos de cobertura, enmiendas, etc.) orientadas a la neutralización de esta limitante, y a la reversión y mejora de las aptitudes físicas de los suelos, deben promover propuesta innovadoras de manejo de los sistemas productivos.

## ■ BIBLIOGRAFÍA

- Alesso, C; Carrizo ME & S Imhoff. 2017. Mapping soil compaction using indicator kriging in Santa Fe province, Argentina. *Acta Agronómica* 66 (1): 81-87.
- Ball, BC; T Batey & LJ Munkholm. 2007. Field assessment of soil structural quality - a development of the Peerlkamp test. *Soil Use and Management* 23:329-337.
- Batey, T & M. McKenzie. 2006. Soil compaction: identification directly in the field. *Soil Use Manage.* 22 (2): 123-131.
- Bautista Cruz, A; J Etchevers Barra; RF Castillo & C Gutiérrez. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. *Ecosistemas* 13 (2): 90-97

- Berardi, J & S Montico. 2015. Valoración cultural y mecánica superficial de suelos cultivados con soja y diferentes antecesores. Actas IX Jornada de Ciencia y Tecnología, UNR. 11 de Noviembre, Rosario. Argentina.
- Blake, G & K Hartge. 1986. Bulk density. En: A. Klute (ed.). Methods of soil analysis, Part 1. 2nd ed. American Society of Agronomy, Madison, Agronomy 9: 363-375.
- Boeringa, M 2005. Kriging Interpolator 3.2 for Arcview Spatial Analyst. En: <http://arcscripsts.esri.com/details.asp?dbid=11294>.
- Bonel, B & H Morrás. 2000. Estudio de la morfología del horizonte superficial de un Argiudol con diferentes manejos de rastrojos. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata del 11-14 de abril de 2000. Actas en CD.
- Bonel, B. 2000. Modificación del estado superficial del suelo bajo diferentes prácticas de manejo de la cobertura en sistemas agrícolas pampeanos. XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata del 11-14 de abril de 2000. Actas en CD.
- Bonel, B; HM Morrás & V Bisaro. 2005. Modificaciones de la microestructura y la materia orgánica en un suelo Argiudol bajo distintas condiciones de cultivo y conservación. *Ciencia del Suelo* 23 (1):1-12.
- Bonel, B & S Montico. 2007. La posibilidad del escarificado en suelos del sur de Santa Fe. *Revista Agromensajes*, Sec. Extensión, Fac. Cs Agrarias, abril de. N° 21, pp 26-27.
- Bonel, B; S Montico; N Di Leo; M Larripa, & J Galli. 2013. Evaluación preliminar del efecto del pastoreo de los cultivos de cobertura invernal bajo siembra directa. Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos, organizadas por la Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo. Actas en CD. Ediciones INTA.
- Botta, GF, A Tolon-Becerra, X Lastra-Bravo & M Tourn. 2010. Tillage and traffic effects (planters and tractors) on soil compaction and soybean (*Glycine max* L.) yields in Argentinean pampas. *Soil Tillage Res.* 110: 167–174.
- Bravo, C & E Andreu. 2011. Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un Alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *Venesuelos* 3(2): 62-68.
- Brouder, S; B Hofmann & HF Reetz. 2001. Evaluating spatial variability of soil parameters for input management. *Better Crops* 85: 8–11.
- Cambardella, CA, TB Moorman; JM Novak; TB Parkin; DL Karlen; RF Turco & AE Konopka. 1994. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
- Castrignanò, A; M Maiorana; F Fornaro & N Lopez. 2002. 3D spatial variability of soil strength and its change over time in a durum wheat field in Southern Italy. *Soil & Tillage Research* 65: 95–108.
- Cotching, W & D Kidd. 2010. Evaluation of surface soil condition in Tasmania, Australia. En 19th World Congress of Soil Science. Brisbane, Australia. 61-65.
- Cressie, N 1993. Statistics for Spatial Data. Wiley-Interscience, New York, USA.
- Di Leo, N; S Montico; L Repetto; E Bonifazi; P Besson & S Cavaglia. 2013. Variabilidad espacial del rendimiento de soja y su relación con la RMP y la CEa en un Argiudol típico. En: Actas I Jornadas Argentinas de Conservación de Suelos. Buenos Aires.
- Di Leo, N; A Saperdi; S Montico & S Cavaglia. 2016. Distribución Espacial de la Resistencia Mecánica a la Penetración en Profundidad en un Argiudol vértico. Actas 1º Reunión Transdisciplinaria en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Cs. Veterinarias y Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR. Casilda-Zavalla.
- Di Leo, N; A Saperdi; S Montico & J Giampaoli. 2016. Variabilidad espacial en la determinación de la estabilidad estructural edáfica con pretratamiento agua. Actas 1º Reunión Transdisciplinaria en Ciencias Agropecuarias. Facultad de Cs. Veterinarias y Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR. Casilda-Zavalla.
- Di Leo, N; A Saperdi & S Montico. 2016. Análisis geoestadístico intralote de la distribución de la materia orgánica de un Argiudol vértico. En: Actas X Jornada de Ciencia y Tecnología. Rosario, Argentina. Año 2016.
- Elisei, J; B Bonel; C Irurtia; S Montico; C Senigagliesi & R Mon. 2012. Descompactación de un Argiudol típico en siembra directa mediante el uso de escarificadores. XIX Congreso latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata. 16 al 20 de abril de 2012. Actas en CD.
- Godwin, R & C Miller. 2003. A review of the technologies for mapping within-field variability. *Biosyst. Eng.*, 1-15.
- Goovaerts, P. 1999. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. *Geoderma* 89: 1–45.
- Hakansson, I & J Lipiec. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil Tillage Research* 53:71–85.



- Hénin, S; R Gras & G Monnier. 1972. El perfil cultural. El estado físico del suelo y sus consecuencias agronómicas. Mundi Prensa. Madrid.
- Horn, R, H Domzal; AS Jurkiewicz & CV Ouwerkerk. 1995. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. *Soil Tillage Res.* 35: 23–36.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.
- INTA. EEA Rafaela. 2017. Mapa de la provincia de Santa Fe. Listado de Series. Disponible: [http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/\\_\\_\\_series/index.htm](http://rafaela.inta.gov.ar/mapas/suelos/___series/index.htm). Consultada: 25/08/2017.
- INTA. EEA Rafaela. 2017. Zonificación agroeconómica de la provincia de Santa Fe. Delimitación y descripción de las zonas y subzonas agroeconómicas.
- Iriondo, M. 1987. Geomorfología y Cuaternario de la Provincia de Santa Fe. *Revista D'Orbignyana*, 4: 1-54.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York.
- Kılıç, K; E Özgöz & F Akbas. 2004. Assessment of spatial variability in penetration resistance as related to some soil physical properties of two fluvents in Turkey. *Soil & Tillage Research* 76: 1–11.
- Kravchenko, AN; KD Thelen; DG Bullock & NR Millar. 2005. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agronomy Journal*, Madison, v.97, p.514–523.
- Mallarino, AP. 1996. Spatial Variability Patterns of phosphorus and Potassium in No-Tilled Soils for Two Sampling Scales. *Soil Science Society of America Journal* 60:1473-1481.
- Montico, S; N Di Leo & G Zerpa. 2002. Compactación en un suelo escarificado a través de lógica difusa. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UN de Cuyo*. Tomo XXXIV (2):57-64.
- Montico, S & B Bonel. 2005. Influencia de la compactación por tránsito sobre la arquitectura de las raíces. En: *Reología del suelo agrícola bajo tráfico*. ISBN 950-34-003-4-0. Ed Edulp. pp 1 - 12.
- Montico, S; N Di Leo & M Giacomoni. 2012. Efecto de la combinación del escarificado y la fertilización sobre la anisotropía física y química en un suelo cultivado con soja. *Agromensajes* N° 34:12.
- Montico, S; N Di Leo; S Cavaglia & E Bonifacci. 2014. Condiciones edáficas de superficie: variación espacial. En: *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas"*. Bahía Blanca, Buenos Aires.
- Montico, S; B Bonel; N Di Leo & J Berardi. 2017. Efecto del pastoreo de cultivos de cobertura sobre condiciones físico-mecánicas superficiales de suelo. *Actas 2º Reunión Transdisciplinaria en Ciencias Agropecuarias*. Facultad de Cs. Veterinarias y Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR. Casilda-Zavalla.
- Montico, S; B Bonel & N Di Leo. 2016. Resistencia y resiliencia edáfica en sistemas integrados. *Actas X Jornada de Ciencia y Tecnología, UNR*. 26 de Octubre, Rosario. Argentina.
- Rossiter, DG. 2002. Metodología para el levantamiento del recurso suelo. *International Institute for Geo-information Science & Earth Observation*. ITC. 145 p.
- Santra, P, UK Chopra & D Chakraborty. 2008. Spatial variability of soil properties and its application in predicting surface map of hydraulic parameters in an agricultural farm. *Curr. Sci.* 95: 937–945.
- Saperdi, A; N Di Leo; S Montico & L Repetto. 2014. Variabilidad espacial de los pre-tratamientos en la determinación de la estabilidad estructural. *Actas XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y II Reunión Nacional "Materia Orgánica y Sustancias Húmicas"*, Bahía Blanca, Buenos Aires.
- Soane, BD & C Van Ouwerkerk. 1994. Soil compaction problems in world agriculture. En: Soane, B. D., and C. Van Ouwerkerk. (Eds). *Soil Compaction in Crop Production*. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier
- Stirzaker, R; J Passioura & Y Wilms. 1996. Soil structure and plant growth: impact of bulk density and biopores. *Plant & Soil* 185:151-162.
- Tekeste, M; R Raper & E Schwab. 2005. Spatial variability of soil cone penetration resistance as influenced by soil moisture on Pacolet sandy loam soil in the Southeastern United States. 2005. Southern Conservation Tillage Systems Conference. Clemson University.
- Utset, A & G Cid. 2001. Soil penetrometer resistance spatial variability in a Ferralsol at several soil moisture conditions. *Soil & Tillage Research* 61: 193–202.
- Veronesi, F; R Corstanje & T Mayr. 2012. Mapping soil compaction in 3D with depth functions. *Soil Till Res* 124: 111–118.

- Vilche, MS; PS Torres & S Montico. 1998. Perfiles culturales originados por labranza continua en un Argiudol vértico de Argentina. En: Tercera Reunión Científica del Grupo Argentino de Biometría. Rosario.
- Vilche, MS & C Alzugaray. 2008. Efecto de la labranza profunda sobre el rendimiento y uso del agua del cultivo de maíz. *Revista Ciencias Agronómicas* (8): 71-81.
- Vilche, M; S Montico & C Alzugaray. 2009. Efecto de la perdurabilidad de la labranza profunda sobre el rendimiento y consumo de agua en el cultivo de soja (*Glicine Max L. Merr.*). En: CD X Congreso Argentino de Ingeniera Rural y II del MERCOSUR. pp 959-965.
- Vilche, MS; C Alzugaray; S Montico; N Di Leo & MC Petenello. 2010. La incidencia de la labor de escarificado en el ambiente edáfico. XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Actas en CD.
- Webster, R, & MA Oliver. 2001. Geostatistics for environmental scientists. "Statistics in practice", (John Wiley & Sons, Ltd Eds.), pp. 1- 271.
- Webster, R. 2008. Soil science and geostatistics. En: Krasilnikov, P. *et al.* (Eds). Soil geography and geostatistics. JRC Scientific and Technical Reports. European Communities. Luxembourg. pp: 1-11.