

**EFFECTO DEL PASTOREO BOVINO SOBRE
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO BAJO
SIEMBRA DIRECTA EN EL SUDOESTE
BONAERENSE.**

FRANCO DANIEL FROLLA

**Trabajo de Tesis para ser presentado como
requisito parcial para optar al Título de
MAGISTER SCIENTIAE en PRODUCCIÓN VEGETAL**

**Orientación: Manejo y Fertilidad de Suelos
Área Ciencias de las Plantas y Recursos Naturales**

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS AGRARIAS

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA**

Balcarce, Argentina

Abril, 2016

**EFFECTO DEL PASTOREO BOVINO SOBRE
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO BAJO
SIEMBRA DIRECTA EN EL SUDOESTE
BONAERENSE.**

FRANCO DANIEL FROLLA

Director: Ing. Agr. José L. Costa, M.Sc., Ph.D.

Co-director: Ing. Agr. Hugo R. Krüger, M.Sc., Ph.D.

Asesora: Ing. Agr. Virginia C. Aparicio, Dr.

**EFFECTO DEL PASTOREO BOVINO SOBRE
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO BAJO
SIEMBRA DIRECTA EN EL SUDOESTE
BONAERENSE.**

FRANCO DANIEL FROLLA

Evaluador: Ing. Agr. Marcelo Germán Wilson, Dr.

Evaluador: Ing. Agr. Laura Ferreras, M.Sc.

Evaluador: Ing. Agr. Roberto Rizzalli, Dr.

DEDICATORIA

A mis viejos, por la forma cariñosa que se dice, pero siempre jóvenes, Daniel y Analia.

AGRADECIMIENTOS.

-A mi novia, Rocío Pozniak, por acompañarme, cuidarme y ayudarme en toda esta etapa de formación académica.

-A mi director de tesis, Jose Luis Costa, por toda la ayuda brindada.

-A mi co-director, Hugo Krüger, por ser artífice de que realice mi maestría, y ser mi guía desde el día cero en esta institución.

-A mi asesora, Virginia Aparicio, por siempre poder contar con ella para resolver las problemáticas diarias.

-A los correctores de la tesis, por su valioso aporte en la elaboración del manuscrito.

-A mis compañeros de trabajo, por poder contar siempre con ellos, tanto de Bordenave: "el Vasco", Pollo, Miguel, Andrea; Julieta, Josefina; como de Balcarce: Gallego, Leonardo, Eduardo, Maxi, Elena, Natalia y Agustín.

-A todos los compañeros del posgrado, que hicieron una estadía llena de risas, alegría y diversión, gracias por aceptarme como soy y poder compartir tantas horas de oficina, de estudio (sin importar el día de la semana), comidas, fiestas, partidos de paddle, paintball y de fútbol, salidas a las playas y los infaltables almuerzos en el patio.

ÍNDICE	
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS.....	V
ÍNDICE.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
1-INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 - La agricultura y ganadería en la Región Pampeana	1
1.2 - Siembra directa.....	2
1.3 - Cambios en Propiedades edáficas bajo SD y Agricultura.....	4
1.4 - SD y su integración con la Ganadería.....	6
1.5 - Formas de estimación de la compactación.....	8
2 - HIPÓTESIS.....	13
2.1 - OBJETIVOS GENERALES.....	13
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	13
3 - MATERIALES Y MÉTODOS.....	14
4 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1 - Selección del lote.....	22
4.1.1 - Resultados de la evaluación del sitio 4.....	23
4.1.2 - Resultados de la evaluación del Sitio 6.....	24
4.1.3 - Relaciones entre CE_a y propiedades del sitio 6.....	29
4.2 - Condiciones meteorológicas durante el ensayo.....	29
4.3 - Biomasa del Verdeo.....	30
4.4 - Propiedades físicas edáficas.....	31
4.4.1 - Densidad aparente.....	31
4.4.2 - Resistencia mecánica.....	35
4.4.3 - Conductividad Hidráulica.....	37
4.4.4 - Curva de retención de agua.....	40
4.4.5 - Macroporosidad.....	42
4.5 - Cultivos de verano	43
4.5.1 - Nitrógeno disponible a la siembra.....	43
4.5.2 - Agua disponible a la siembra.....	44
4.5.3 - Implantación de los cultivos sucesores.....	44

4.5.4 - Desarrollo de los cultivos sucesores.....	46
4.6 - Relación entre variables estudiadas.	49
5 - CONCLUSIONES.	54
6 - BIBLIOGRAFÍA.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1 - Adopción de SD (% de área sembrada) por partido en el área de influencia de EEA Bordenave. G= Ganadería. A = Agricultura. Fuente: Sistema de soporte de decisiones (SSD), Coma (2012).	3
Figura 2 - Representación gráfica de un semivariograma teórico y sus partes constituyentes (Morales, 2004).	16
Figura 3 – Superior, semivariogramas direccionales para CEa, izquierda S6, derecha S4. Inferior, izquierda: semivariograma omnidireccionales para el lote S6, derecha: semivariograma omnidireccional para el lote S4.	23
Figura 4 - Mapa originado por kriging ordinario para el sitio 4. Se muestra el mapa obtenido con el uso del semivariograma direccional.....	24
Figura 5 - Mapa de CEa para el sitio S6. Se muestra el mapa obtenido con el uso de semivariograma direccional.	25
Figura 6 - Relación entre CEa y los contenidos de a+L (en porcentaje) para 10 puntos de muestreo en el sitio 6.	26
Figura 7 - Relación entre los valores de CEa y los contenidos gravimétricos de agua promedio en el perfil (0-80 cm) en las parcelas testigos, previa a los pastoreos y a la siembra.....	29
Figura 8 - Evolución de las precipitaciones (mm) durante el periodo de estudio.	30
Figura 9 - Valores de DA posterior a los pastoreos para las distintas texturas evaluadas en las capas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm. AF: Arenoso Franco, FA: Franco Arenoso, FaA: Franco arcillo Arenoso.	32
Figura 10 - Relación entre los valores medios de DA (Mg m^{-3}) y MO (%) para las 9 parcelas del tratamiento con mayor carga animal (PES) en la capa 0-20 cm del suelo. Puntos rellenos indican valores de DA Pospastoreo, vacíos Prepastoreo.....	33
Figura 11 - Relación entre los valores de ΔDA y los valores de Nan (mg kg^{-1}) para las parcelas con la mayor carga animal (PES) en la capa 0-20 cm del suelo.	34
Figura 12 - Valores de DA posterior a los pastoreos para los distintos tratamientos evaluados en las capas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm. Barras indican error estándar.....	35
Figura 13 - Valores de RM para los distintos tratamientos de carga evaluados, asteriscos indican diferencias significativas de PES y MOD contra TES, línea solida indica el límite crítico de resistencia a la penetración.	37
Figura 14 - Distribución original (izquierda) y transformada (derecha) por el método de Box-Cox para los datos de conductividad hidráulica saturada.	38
Figura 15 - Valores de conductividad hidráulica transformada posterior a los pastoreos ($K_t(0)$) y diferencia de conductividad hidráulica transformada entre fechas de muestreo ($\Delta K_t(0)$). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos.....	38
Figura 16 - Conductividad hidráulica transformada (K_t) para distintas tensiones en los tratamientos evaluados. Barras indican error estándar. Línea corresponde al ajuste exponencial de los datos.	39
Figura 17 - Contenido volumétrico de agua a distintas tensiones de medición ($pF = \log(h)$). Superior: curvas para los distintos tratamientos de pastoreo	

evaluados, inferior: curvas para las diferentes texturas. Barras indican error estándar.....	41
Figura 19 - Macroporosidad para distintas tensiones evaluadas en la capa 0-5 cm, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos.	43
Figura 20 - Contenidos de agua gravimétricos en el momento de la siembra de verano para las distintas texturas evaluadas, en las capas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm.	44
Figura 21 - Número de plantas emergidas por metro lineal, en función del tiempo en días desde la siembra del cultivo. Superior: Sorgo, Inferior: Soja.	45
Figura 22 - MS media de sorgo (g pl.^{-1}) en estadio V8 en función del nivel de humedad gravimétrica en la capa 0-80 cm en la siembra del cultivo.....	47
Figura 24 - Altura media de sorgo en estadio V8 función del nivel de Nan en la capa 0-20 cm.	48
Figura 25 – Contenido de Nan para diferentes texturas en la capa 0-20 cm. ...	48
Figura 26 - Relación entre los valores medios de resistencia mecánica (0-5 cm) y los valores medios de conductividad hidráulica (cm h^{-1}) sin transformar.	50
Figura 27 - Relación entre los valores de $K(0)$ y macroporosidad (poros > 50 μm de diámetro) en las texturas evaluadas.	51
Figura 28 - Relación entre los valores de RM (MPa) y macroporosidad previas y posterior al pastoreo. Línea indica ajuste de regresión polinómica de segundo grado.	51

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1 - Resumen de trabajos en los cuales se observo el efecto del pastoreo de verdeos y/o rastrojos en rotaciones bajo SD. F: Franco; Fa: Franco arcilloso; FA: Franco Arenoso; FL: Franco Limoso; FaA: Franco arcilloso Arenoso; V: Vacunos; Vq: vaquillona; No: Novillo; SD: Siembra Directa; LR: Labranza Reducida; LC: Labranza Convencional; A: Avena; M: Maíz; S: Soja; Vi: Verdeo invierno; VV: Verdeo verano; RR: Rastrojos; CC: Cultivo cobertura; Ci: Cultivo invierno; G: Girasol; PP: Pastura permanente; SE: Sin efecto; CE: Con efecto negativo; NI: No indica.....	12
Tabla 2. Valores resúmenes de CE_a ($mS\ m^{-1}$) para ambos lotes evaluados. ...	22
Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson y niveles de significancia para las distintas propiedades evaluadas en el S4 (0-20 cm), ns: diferencias no significativas, * diferencias significativas ($p<0,05$), *** diferencias muy significativas ($p<0,01$), a+L: contenido de limo + arcilla. PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, Ce a: Conductividad eléctrica aparente.	27
Tabla 4. Coeficiente de correlación de Pearson y niveles de significancia para las distintas propiedades evaluadas en el S6 (0-20 cm), ns: diferencias no significativas, * diferencias significativas ($p<0,05$), *** diferencias muy significativas ($p<0,01$), a+L: contenido de limo + arcilla, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, Ce a: Conductividad eléctrica aparente.	28
Tabla 5. Contenidos de humedad gravimétricos promedios ($kg\ agua\ kg\ suelo^{-1}$) para distintos momentos de muestreo, en el perfil (0-80 cm) y en el horizonte superficial (0-20 cm) en paréntesis se indica el porcentaje de la capacidad de campo alcanzada.	30
Tabla 6. Valores medios de DA ($Mg\ m^{-3}$) para la capa 0-20 cm, posterior a los pastoreos y la diferencia entre valores observados Pospastoreo-Prepastoreo (ΔDA). Letras en minúscula indican diferencias entre tratamientos.....	31
Tabla 7. Valores medios de RM (Mpa) para los distintos tratamientos y texturas. Letras mayúsculas indican diferencias entre profundidades (cm), letras minúsculas entre tratamientos o texturas, según corresponda.....	36
Tabla 8. Valores sin transformar de K ($cm\ h^{-1}$) para los distintos tratamientos a distintas tensiones. CV (coeficiente de variación).....	40
Tabla 9. Medias y desvío estándar para las variables analizadas en el cultivo de sorgo en el estadio de V8, letras indican diferencias entre tratamientos o texturas.....	47
Tabla 10. Valores medios ($kg\ ha^{-1}$) para distintas variables analizadas a cosecha de las plantas de sorgo. Letras indican diferencias significativas entre texturas.....	49

RESUMEN.

La compactación originada por el pisoteo animal es uno de los factores responsables de la degradación del suelo, este hecho es agravado en sistemas de siembra directa (SD) donde no ocurren remociones periódicas de los estratos superficiales. El efecto del pisoteo sobre las propiedades físicas es variable en función de la textura, carga animal, humedad del suelo y tiempo de permanencia de los animales, pudiendo afectar a los cultivos sucesores. La SD permite reducir procesos erosivos, conservar agua y estabilizar rendimientos. Por otro lado, las actividades ganaderas son biológicamente menos productivas pero más estables, siendo un factor importante en la estrategia productiva de regiones semiáridas. El objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del pastoreo con diferentes cargas animales, sobre algunas propiedades físicas del suelo en diferentes texturas, como así, su efecto en cultivos sucesores de verano, sembrados en SD. En el campo experimental de INTA Bordenave, se realizó un análisis exploratorio con la sonda de electro-conductividad aparente (CE_a) EM-38MK2, en dos lotes con historia ganadera en SD, detectándose en uno de ellos tres texturas: Arenosa Franca (AF), Franca Arenosa (FA) y Franco arcillo arenosa (FaA). Se utilizó la relación entre CE_a y textura para el establecimiento de los ensayos. En dicho lote, se sembró Centeno (*Secale cereale*) + Vicia (*Vicia villosa* Roth.) para pastoreo con vacas de cría. En cada situación estudiada (clases texturales) se utilizaron 3 niveles de carga animal: 0 cabezas.día.ha⁻¹ (TES), 200 cabezas.día.ha⁻¹ (MOD) y 400 cabezas.día.ha⁻¹ (PES). Se determinó: densidad aparente (DA), resistencia mecánica (RM) y conductividad hidráulica (K) en tres tensiones (0 cm; 1,5 cm; 3 cm). En la capa 0-5 cm, se determinó la curva de retención de agua hasta 56 cm de tensión (CRA) y macroporosidad (MACRO). Terminado los pastoreos y posterior al muestreo de suelos, se sembró sorgo granífero (*Sorghum bicolor* L.), y soja (*Glycine max*) en franjas divididas, se determinó agua en el suelo (0-80 cm) y nitratos (0-60 cm) con el fin de detectar cambios en la capacidad de mineralización del suelo y reducciones en la eficiencia de captación de agua. La DA mostro interacción entre tratamientos y texturas, el TES se diferenció de PES y MOD solo en la textura AF. La RM mostro interacción entre tratamiento y profundidad. El tratamiento TES se diferenció de MOD y PES en las capas 0-5 cm; 5-10 cm sin diferencias en las restantes. La K(0) mostró diferencias significativas entre TES con los restantes tratamientos, la K fue afectada hasta la tensión de 1,5 cm, correspondiente a poros mayores de 1000 µm de diámetro. La CRA presentó diferencias significativas entre tratamientos, como así, a través de las diferentes texturas. El TES se diferenció

de ambos tratamientos (PES o MOD) en todas las tensiones excepto en la tensión 56 cm. La MACRO de los tratamientos analizados solo presentó diferencias significativas entre tratamientos a la mayor tensión evaluada (56 cm) entre TES y los restantes tratamientos. No se observaron diferencias en el contenido de agua y nitratos a la siembra de los cultivos de verano como así en la implantación y desarrollo de los mismos. Un aumento de la RM se relacionó con una degradación de los poros de mayor conducción del suelo. Se observó una relación entre el volumen de poros mayores a 50 μm y los valores de $K(0)$. Para las condiciones planteadas en este ensayo, no se observó interacción en la mayoría de las variables de suelo analizadas. Los mayores contenidos de arcilla+lino analizados no produjeron un mayor impacto negativo en las propiedades físicas del suelo. No se observó una interacción entre los grupos texturales, carga animal y el grado de afectación de las propiedades físicas. Solo se observó interacción en la DA. Bajo las condiciones ocurridas en el ensayo, no se observó una mejor implantación del cultivo de Sorgo sobre la Soja.

Palabras Clave: compactación, pisoteo, ganadería, siembra directa.

ABSTRACT.

Compaction caused by animal trampling is one of the factors responsible for soil degradation. This fact is aggravated in no-till systems (NT) where there is no periodic removal of the surface layers. The effect of trampling on the soil physical properties varies depending on the texture, stocking rate, soil moisture and permanence of the animals, also affecting the following crop. NT reduces erosion, retains water and stabilizes yields. On the other hand, livestock activities are biologically less productive but more stable, being an important factor in the productive strategy in semiarid regions. The aim of this study was to evaluate the effect of animal grazing with different loads on some soil physical properties in different textures, and its effect in summer crops under NT. The study was set up in the experimental field of INTA Bordenave. An exploratory analysis using the of electrical-conductivity probe (CE_A) EM-38MK2 was conducted in two fields with a livestock history under NT. In one of the fields, three textures were detected: sandy loam (SL), loamy sand (LS), and sandy clay loam (SCL). The relation between CE_A and texture was used for the establishment of the experimental plots. In this field Rye (*Secale cereale*) + Hairy Vetch (*Vicia villosa* Roth.) was sowed for breeding cows. In each of the mentioned textures, three treatments with 3 replicates were established. The levels of stocking rate used were: zero load: 0 heads.day.ha⁻¹ (TES), moderate load: 200 heads.day.ha⁻¹ (MOD) and heavy load: 400 heads.day.ha⁻¹ (HEV). The apparent density (DA), the mechanical resistance (MR), and the hydraulic conductivity (K) at three tension values (0 cm; 1,5 cm; 3 cm) was measured at each level. The water retention curve was determined up to 56 cm of tension (CRA), as well as macroporosity (MACRO), both in the 0-5 cm layer. Once grazing was done and the soils were sampled, sorghum (*Sorghum bicolor* L.) and soybean (*Glycine max*) was sowed in divided stripes. At the sown of summer crops, was evaluated water in the soil (0-80 cm), nitrates (0-60 cm) for detect changes in the capacity of mineralization of soil and reductions in the efficiency in water caption.

There was an interaction of DA between treatments and textures. The TES and PES differed only in the SL texture. MR showed interaction between treatments and depth. The TES treatment differed from MOD and PES in the 0-5 cm and 5-10 cm layers. Whereas there was no significant differences in the remaining depths. The K(0) showed a significant difference between TES and the other treatments. A similar pattern was obtained at K(1,5), but not at K(3). The animal trampling affected pores with a diameter bigger than 1000 µm. The CRA presented significant differences between treatments, as well as between the different textures. TES had differences

with both treatments (HEV or MOD) in all tensions, except at tension 56 cm. The MACRO only had significant differences between TES and the other treatments at tension 56 cm. No differences were observed in the water storage and nitrate content at the moment of the summer crops sowing, as well as in the sprouting and development of crops. The increase in the MR was associated with the degradation of pores with big diameter. There was a relationship between the volume of pores larger than 50 μ m and K(0) values. At the conditions of the present study, no interaction was observed in most of the analyzed soil variables. The bigger contents of clay+lime, not produced a negative impact in physic properties of the soil. Don't find interaction between textural groups, stocking rate, and the level of damage of physic properties. Only one interaction was observed (DA). Under the conditions that occurred in this experiment, not was a better implantation of the sorghum over the soybeam.

Keywords: compaction, trampling, livestock, no tillage.

1-INTRODUCCIÓN

1.1 - La agricultura y ganadería en la Región Pampeana

Hasta las décadas de 1970-80 la expansión agrícola se apoyó en la expansión geográfica del área cultivada, una vez acabada esta posibilidad los aumentos productivos se hicieron a base de mayor uso de insumos y tecnologías (Viglizzo; Jobbágy, 2006). La agricultura en expansión sobre áreas cada vez más marginales, se basó en una estructura de cultivos seleccionados con alta homogeneidad genética, siembra directa (SD), mayor uso de fertilizantes, plaguicidas, y últimamente agricultura de precisión. Es así que se desplazó (o movilizó) la producción de cría de bovinos y ovinos hacia zonas más marginales (Satorre, 2005).

Estas modificaciones al agroecosistema trajeron aparejados aumentos de rendimientos en las producciones y lograron colocar cultivos donde antes no se consideraba posible. No se puede ocultar la importancia a nivel económico que tuvo esta expansión, el avance sobre nuevas áreas de cultivo generó una infraestructura dada por la necesidad de producir y canalizar estos productos hacia los mercados, lo cual transformó la dinámica económica de las poblaciones rurales (Rudel, 2007). A su vez, y no menos importante, se generó un impacto ecológico dado por la simplificación de los ecosistemas (Viglizzo; Jobbágy, 2006) y la incorporación de nuevas técnicas productivas.

La Pampa Húmeda fue uno de los principales sitios que sufrió esta transformación, los sistemas mixtos con rotaciones pasturas-cultivos fueron transformados. La eliminación del rodeo bovino generó la desaparición de las pasturas en las rotaciones, con la consecuente pérdida de los beneficios aportados por el manejo de sistemas mixtos. Los grandes volúmenes de biomasa aérea y radical generados por las pasturas, más la ineficiencia en la extracción y metabolización de los recursos forrajeros por parte del ganado, son los principales responsables en el mantenimiento y/o restauración de la calidad edáfica. Un vacuno, en promedio, no puede cosechar más del 60% de la biomasa aérea y devuelve con sus excretas el 60% de los nutrientes ingeridos (Perdomingo, 2004).

El 75% del área correspondiente a la Pcia. De Buenos Aires pertenece a la Pampa Húmeda, y el resto a la región semiárida. Esta última se ubica en el sudoeste bonaerense (SOB), poseyendo características climático-edáficas que la diferencian de zonas más húmedas, siendo las empresas agropecuarias que existen en dicha región de menor capacidad productiva. En esta zona se encuentra el 15% del rodeo bovino provincial, siendo esencialmente una zona ganadera agrícola donde el uso

agrícola disminuye de norte a sur y de este a oeste (Plan desarrollo del Sudoeste, 2009).

Hasta el año 2010, la agriculturización de la región pampeana provocó una reducción del área destinada a ganadería en aproximadamente 13.000.000 has, lo cual repercutió en una concentración de cabezas en regiones extra-pampeanas (NEA y NOA), no obstante, la región Pampeana sigue conservando el 54% del stock vacuno (Rearte, 2010). La región semiárida presentó un crecimiento en cabezas durante el periodo 1994-2006 debido a la movilización de animales de zonas más húmedas, originando una sobrecarga en los lotes productivos. La disminución en la proporción de pasturas implantadas y la sobrecarga ganadera generaron una alta mortandad de vientres durante la sequía del 2009, con una descapitalización de los productores de la región (Rearte, 2010).

1.2 - Siembra directa.

Según estimaciones de AAPRESID (2012), Argentina cuenta con unas 27.000.000 has bajo siembra directa (SD). Sin embargo, la adopción de esta tecnología dentro de la región semiárida bonaerense es aún baja. Sobre una serie de 490 entrevistas realizadas por la Universidad Nacional del Sur en el SOB, se estimó una adopción del 26% en lotes de producción agrícola y un 14% sobre lotes implantados para pastoreo en la región semiárida (Bahía Blanca, Cnel. Rosales, Tornquist, Púan). Por su parte, en la región subhúmeda del SOB, el 51% de la producción agrícola se encuentra bajo labranza cero con solo una adopción del 13% en lotes para pastoreo animal (Adolfo Alsina, Guaminí, Saavedra, Cnel. Suárez, Cnel. Pringles) (Figura 1) (Coma, 2012).

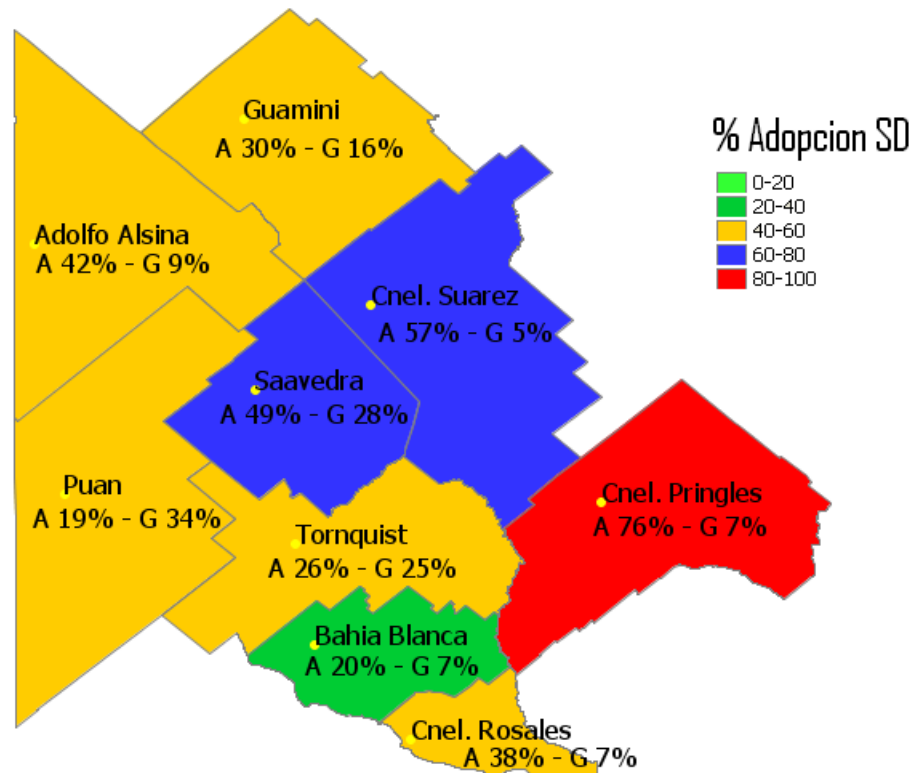


Figura 1 - Adopción de SD (% de área sembrada) por partido en el área de influencia de EEA Bordenave. G= Ganadería. A = Agricultura. Fuente: Sistema de soporte de decisiones (SSD), Coma (2012).

La baja adopción de la SD en sistemas mixtos en zonas semiáridas y sub-húmedas puede deberse al desconocimiento del efecto de la técnica en lo que respecta a la evolución de la cobertura del suelo, la compactación y el efecto sobre el cultivo sucesor. En este marco el productor puede optar por no incorporar SD en su campo, excluir los animales en rotaciones bajo SD, desplazar la ganadería a suelos de menor aptitud, intensificar la producción ganadera con encierres a corral o intentar la convivencia entre ambas actividades (Zamora et al., 2006).

Bajo SD y en sistemas de producción mixtos, la compactación superficial por pastoreo puede constituir un riesgo potencial (Morán et al., 2000). Esto se ve favorecido por los suelos de la región semiárida, los cuales presentan una baja resistencia a la compactación por tránsito (Amiotti, 1996). Dicha situación, genera dudas acerca de la sustentabilidad de la siembra directa y suele ser motivo de no adopción de la técnica por parte de productores.

La capacidad productiva de los suelos con aptitud ganadero-agrícola en SOB semiárido es baja. Por otra parte, el clima es muy variable imposibilitando migrar a sistemas de agricultura pura, además de poseer las empresas de dicha región una

baja escala productiva. La SD permite reducir los procesos erosivos, conservar agua y lograr rendimientos aceptables, por otro lado, su adopción lleva a mayor uso de insumos con un mayor riesgo económico en caso de fracaso. Las actividades ganaderas son biológicamente menos productivas pero más estables (Fernández; Zuccardi, 2007; Cervini; Demarco, 2003).

Una interacción adecuada entre SD y ganadería, podría ser una alternativa viable para los sistemas productivos, puesto que permitiría producir conservando los recursos y favorecer el crecimiento de las economías regionales. Por otro lado, sería factible atender mercados que exigen productos específicos como la carne pastoril (la cual puede generar ingresos extras por un sobreprecio en función de su calidad), sumado al efecto social que genera la ganadería al arraigar personal dentro de las producciones para el cuidado de los animales (Sevilla; Pasinato, 2006).

1.3 - Cambios en Propiedades edáficas bajo SD y Agricultura.

La capitalización de grandes empresas agropecuarias junto a la aparición de los “pools” de siembra permitió el uso de maquinarias cada vez más grandes y pesadas, con un tránsito creciente debido al doble cultivo, ausencia de rotaciones agrícolas, baja remoción del suelo por parte de la SD, y frecuentemente el tránsito con elevado contenido de humedad del suelo (por la necesidad de continuar con las tareas de siembra o de cosecha), forman un conjunto de factores negativos que atentan contra la salud física del suelo en sistemas agrícolas. La compactación es uno de los problemas más graves originados por la agricultura (McGarry; Sharp, 2001). Diversos autores hallaron rendimientos de los cultivos comparables a los de labranza convencional (LC) y aún mayores en SD, especialmente en años con sequía moderada y suelos con buena capacidad de retención de agua (Krüger, 1995; Ripoll et al., 2001). A su vez, en sistemas bajo SD, la cobertura del suelo durante el barbecho presenta ventajas en cuanto al control de la erosión eólica y, en menor medida, hídrica (Krüger et al., 2005), lo cual justificaría en el tiempo una mayor difusión en el SOB de dicha técnica.

Aparicio y Costa (2000) indicaron aumentos en la resistencia mecánica (RM), disminución de la infiltración y aumento de la densidad aparente (DA) en la capas superficiales del suelo bajo SD, luego de 2 años de iniciado un ensayo comparativo de labranzas en 3 localidades. Otros autores detectaron pérdidas en la estabilidad estructural (EE) de los suelos y de materia orgánica (MO) bajo SD, cuando se comparan con sistemas con labranza reducida (LR) (Schmidt; Amiotti, 2012). Estos resultados se contraponen con lo observado por Elissondo et al., (2000) y Krüger

(1996) quienes hallaron una tendencia al aumento en la EE bajo SD con respecto a LC. Asimismo, Schmidt (2015), detectó aumentos en la DA para las capas 5-10 cm y 10-18 cm, con un aumento significativo de la RM (aún a capacidad de campo) luego de 15 años de SD. Aumentos de la densidad del suelo también fueron observados por Colombani et al., (2002) en un ensayo de larga duración en la estación experimental de EEA Balcarce.

Los incrementos en la RM en sistemas de SD suelen afectar la producción temprana de biomasa de los cultivos, generalmente en los primeros años de SD (Bergh et al., 1996; Ripoll et al., 2001). Sin embargo, este incremento en la RM no siempre termina transformándose en pérdidas de rendimiento, debido a que existen mecanismos propios de las raíces para sortear estas dificultades, dadas por la posibilidad de deformación del ápice radical, la habilidad de curvarse alrededor de obstáculos y capacidad de lubricación vía mucilago (Russell; Goss, 1974)

Álvarez (2013) indica la formación de capas superficiales laminares en suelos Franco-limosos/arcillosos en SD, que reducen la infiltración del suelo. Álvarez y Steinbach (2009) indican que algunas texturas son más susceptibles a la compactación, especialmente sensibles son aquellas con alto contenido de limo, mostrando además una baja resiliencia. Los autores mencionados anteriormente, en un meta-análisis comparando sistemas de labranzas en la región pampeana detectaron que, en promedio, los rendimientos del cultivo de soja no se ven modificados por el sistema de labranza. Y en caso que esto ocurrió, los mismos están relacionados con una menor disponibilidad de nitrógeno y/o efectos negativos en las propiedades físicas del suelo (Ferrerías et al., 2000; Díaz Zorita et al., 2001). Según este estudio, la incorporación de SD mostró un bajo impacto sobre la DA (no siendo el efecto tiempo dependiente), incrementó la resistencia mecánica (30%), aumentó la estabilidad estructural y la tasa de infiltración. Se concluyó que a nivel agronómico, el impacto en las propiedades físicas es bajo, especialmente en los suelos de textura más gruesa.

Esta aseveración dependerá de los distintos factores que interaccionan en cada uno de los sistemas productivos, siendo toda extrapolación riesgosa debida a la alta variabilidad de los suelos (Schmidt; Amiotti, 2012) y la dificultad de repetir exactamente las mismas condiciones de los factores influyentes. Esto vuelve al sistema altamente sitio-dependiente, imposibilitando realizar conclusiones validas sobre el efecto del pastoreo para distintas situaciones productivas (Green et al., 2003; Strudley et al., 2008).

1.4 - SD y su integración con la Ganadería.

Según (Imhoff et al., 2000) la compactación dada por el pisoteo de los animales es uno de los factores responsables de la degradación del suelo. El pisoteo afecta principalmente los macroporos de mayor diámetro ($> 100 \mu\text{m}$), precisamente aquellos responsables del mantenimiento de la vida dentro de la rizosfera (Taboada, 2007). Debido a ello, todo daño por compactación implica la ocurrencia simultánea de: aumentos de DA, descensos de macroporosidad, aumentos de RM superficial, descensos de infiltración y conductividad hidráulica saturada (Taboada, 2007; Pietola et al., 2005).

Los cambios ocurridos en las propiedades edáficas estarán dados en función de la carga instantánea, estructura del suelo, textura, cobertura, contenido hídrico del perfil, tipo de vegetación, y pendiente (Donkor et al., 2002; Mwendera; Saleem, 1997; Ferrero; Lipiec, 2000; Roundy et al., 1990; Taboada, 2007; Greene et al., 1994; Gifford; Dadkhah, 1980). Alta DA y RM están asociadas a altas cargas instantáneas (Bryant et al., 1972). Incrementos en la carga animal también se vincularon a bajos valores de conductividad hidráulica (Holt et al., 1996).

García Prechác (1998) expresa que la compactación en SD bajo pastoreo es más creencia que realidad, ya que la compactación es también una consecuencia del laboreo convencional. En sistemas bajo SD con ganancia de MO, mayor actividad biológica y suelo no perturbado, lo que debería esperarse, es mejora de la condición física y no el deterioro de suelos. Moran et al., (2000) observaron un aumento en la DA y RM con una reducción en la infiltración luego del pastoreo de un verdeo sobre un suelo Argiudol. Sin embargo en ese estudio, el cultivo de soja posterior no sufrió efectos negativos en el rendimiento, atribuible a las buenas precipitaciones ocurridas durante el ensayo. En una experiencia similar Venanzi et al., (2004) determinaron un aumento de DA y RM, con dificultad de implantación y raíces desviadas en el cultivo de verano posterior. Aun así, no se encontraron diferencias de rendimientos entre tratamientos Pastoreados y No pastoreados, posiblemente debido a las bajas precipitaciones ocurridas durante el cultivo de verano, siendo coincidente con lo demostrado por Moran et al., (2000), en el cual los efectos producidos por el pastoreo pueden ser enmascarados por las condiciones meteorológicas que imperan en el ciclo del cultivo.

Esposito et al. (2002) analizaron el espacio poroso en ensayos de labranzas con pastoreo de rastrojo, observando que suelos bajo SD y LR presentaron en los 10 primeros cm del suelo una mayor porosidad total (PT) y una mayor proporción y continuidad de los macroporos con respecto a LC. En relación al efecto del pastoreo,

el mismo no tuvo efectos sobre el rendimiento del cultivo, sin presentar interacción con los sistemas de labranza. Agostini (2009) tampoco observó cambios significativos en las propiedades del suelo pastoreando rastros en un suelo franco arcilloso con distintos tipos de carga. Quiroga et al. (2009) arribaron a una conclusión similar sobre un ensayo de labranzas con 5 años de efecto acumulado, pastoreando rastros en suelos de textura más gruesa que el anterior.

Kiessling (2012) detectó un aumento en la DA en la capa 5-15 cm durante el ciclo de pastoreo en un verdeo invernal en un suelo de textura Franco, pero luego de 8 años de iniciada la experiencia y 3 ciclos de pastoreo, observó que el pisoteo animal no produjo cambios en la DA y la porosidad total (PT) respecto de los valores al inicio de la experiencia. El mismo autor determinó un efecto nulo del pisoteo en los 0-5 cm sobre propiedades físicas del suelo, el cual había sido informado por una gran cantidad de autores (Tollner et al., 1990; Terashima et al., 1999; Ferrero; Lipiec, 2000; Clark et al., 2004; Franzluebbers; Stuedemann, 2008; Quiroga et al., 2009). Dicho resultado estaría influenciado por el tiempo ocurrido desde el pastoreo hasta la fecha de muestreo (18 meses). Según Agostini (2009) dicha situación se manifiesta principalmente cuando el muestreo se realiza luego de 6 meses del pisoteo animal, debido a una recuperación natural dada por la resiliencia del suelo y la proliferación de raíces de cultivos siguientes. En cambio, en un ensayo comparativo entre sistemas de labranzas con y sin pastoreo, Parra (2006) observó una pérdida de poros $> 75 \mu\text{m}$ de diámetro con un aumento de microporos, infiriendo que en suelos de textura franco arenosa con larga historia en SD, serían necesarias remociones periódicas para mantener un buen sistema poroso.

Zamora et al. (2006) no observaron efectos negativos atribuidos al pastoreo en un verdeo invernal, sobre un sucesor girasol, sin embargo los resultados fueron diferentes cuando se analiza trigo implantado luego del cultivo de verano. Los autores atribuyen las diferencias observadas a la baja disponibilidad hídrica durante el ciclo del trigo, situación que permitió expresar los efectos negativos del pastoreo animal. La humedad del suelo condiciona la RM, permitiendo a las raíces el crecimiento en sitios donde, en condiciones más secas, no ocurriría. Esto indicaría que el efecto "compactación" realmente existe pero frecuentemente es enmascarado por otros factores. Este hecho también fue observado por Krüger et al. (2008), luego de 7 ciclos en rotación Trigo/Avena/Girasol, la RM aumentaba significativamente previo a la siembra del girasol (posterior al pastoreo del verdeo) y disminuía a la siembra del siguiente cultivo de avena (luego del trigo). Aunque existió una recuperación de la estructura, la

disminución temporaria de la RM no permitió llegar a los valores iniciales de la experiencia y por el contrario presentó una tendencia general creciente en el tiempo. Luego de 7 años, en promedio, el girasol perdió 498 kg vs el sistema sin avena pastoreada. Scapini et al., (1997) determinaron en una rotación avena/maíz bajo SD y pastoreo sobre textura superficial franca, una variación temporal de las clases de tamaños de poros en tres años. Esta variación presentó un patrón cíclico con una reducción de poros grandes y un aumento de poros pequeños que indicaría un estado de compactación acumulativo y progresivo.

Por otro lado, es importante destacar el rol de la MO, la cual contribuye a reducir la DA del suelo como así también su compactibilidad (Taboada, 2007; Cochrane; Aylmore, 1994; Thomas et al., 1996) favoreciendo la resiliencia del suelo (Agostini, 2009). Mantener o incrementar los niveles de MO estabiliza el suelo. Otros autores no observaron una correlación positiva entre estas variables (Dexter et al., 1984); o bien un comportamiento diferencial en función de su origen. La materia orgánica originada por la proliferación y crecimiento de raíces presenta una mejor capacidad en soportar el stress por compactación que aquella originada por el agregado de enmiendas al suelo (Ekwue, 1990). Según Ball et al. (2000), la MO fácilmente oxidable del suelo es más relevante en lo que respecta soportar el stress por compactación, que considerar el total de la MO. La porción humificada de la MO presenta un complejo rol en la estabilización de los agregados del suelo, mayores contenidos de material humificado confieren mayor estabilidad a los agregados reduciendo la compactibilidad del suelo (Soane, 1990).

1.5 - Formas de estimación de la compactación.

Las metodologías clásicas para evaluar la compactación de los suelos se basan en la estimación del cambio en la RM del suelo, el aumento de la DA, cambios porcentuales entre tamaños de poros y variaciones en la conductividad hidráulica del suelo.

Los penetrómetros permiten una comparación entre tratamientos para similares contenidos de humedad y han sido ampliamente utilizados para la detección de capas densificadas (Cerana et al., 2004). Las raíces de los cultivos responden a una mayor impedancia mecánica del suelo, pero a su vez poseen mecanismos para sobrepasar estas limitantes, y, aunque se constate la presencia de una capa endurecida suelen poseer quiebres o fisuras por las cuales las raíces pueden atravesar. Con respecto al instrumental, los penetrómetros poseen componentes de compresión, fricción y corte del suelo, siendo la separación de sus componentes poco factible en la práctica y

menos diferenciable (el efecto predominante) a medida que aumenta la humedad del suelo, requiriendo mediciones a similares contenidos de humedad para poder realizar comparaciones (Collazo, 2004). Dichas variables generaron una gama de valores críticos para distintas situaciones experimentales, encontrándose en la bibliografía valores críticos que van desde 1 a 5,6 MPa (Martino, 2001), siendo el más aceptado como valor crítico para las condiciones de suelos en Argentina, un valor de 2,5 MPa. (Pabin et al., 1998; Hamza; Anderson, 2005). Si el suelo posee un buen sistema poroso el crecimiento ocurre aún bajo altos valores de RM (Martino, 2001) lo cual indicaría una falta de sensibilidad del método.

Otra determinación utilizada en la evaluación de la compactación, es la DA, la cual expresa la relación directa entre masa y volumen de suelo. Siendo un parámetro que refleja de modo indirecto el estado estructural y el grado de compactación de un suelo (Cerisola, 2004). Un aumento de densidad no indica exclusivamente una pérdida de calidad de suelo, ya que dicha propiedad mide todos los poros que se encuentran en un volumen determinado, siendo que, en función del proceso que se esté analizando, la distribución porcentual de las distintas clases de poros puede ser de mayor importancia. En relación al rendimiento de los cultivos, es un parámetro que presenta valores óptimos que varían en función de los diferentes tipos de suelos (Håkansson et al., 2000). La RM suele ser más sensible en la detección de efectos de pisoteo a nivel superficial que la DA (Martínez et al., 2010)

Las determinaciones de porosidad a campo y en laboratorio permiten tener un mejor entendimiento de los procesos que afectan la compactación de los suelos. Valores críticos de macroporosidad han sido delimitados como un 10% del volumen total de poros (Quiroga; Romano, 2012). Una caída sobre este porcentaje implicará problemas en la infiltración (Sparling; Schipper, 2002). Las técnicas requeridas para las determinaciones incluyen el uso de mesa de tensión confeccionando las curvas de retención de agua para distintas tensiones, o el uso de infiltrómetros de disco a tensión (Perroux; White, 1988) que miden la infiltración correspondiente a distintas categorías de poros en función de la tensión aplicada en el dispositivo. Los infiltrómetros de disco a tensión son útiles y precisos para determinar la conductividad hidráulica de poros mayor a 500 μm de diámetro, siendo las determinaciones realizadas en las mesas de tensión más apropiadas para estudios de poros con un diámetro menor a 500 μm (Imhoff et al., 2010).

Debido a la incapacidad de reducir su diámetro por parte de las raíces, se ha estipulado que el tamaño mínimo para la exploración del suelo se encuentra dado por

el diámetro de los poros y la compresibilidad del suelo. Por lo cual la proporción de poros mayores a 100 μm de diámetro (Gibbs et al., 1988) o 50 μm (Goss, 1977) puede ser de utilidad como indicador de capacidad de crecimiento radical. La medición de rango de poros por medio del infiltrómetro a disco a tensión es poco práctica debido a la excesiva tensión que se debería aplicar para restringir los grupos restantes de poros, tornándose mediciones de muy larga duración. Por tal motivo la utilización de mesas de tensión (Stackman et al., 1969) permite obtener información sobre el porcentaje de poros a mayores tensiones.

Las limitaciones de estos procedimientos están en no reconocer el origen de la porosidad, ya que las raíces de los cultivos y la actividad de los microorganismos generan un aumento de la porosidad, que resulta ser más estable al no laborear el suelo en SD (Sasal; Andriulo, 2005). El laboreo mecánico genera grandes aumentos de porosidad con mayor porcentaje de macroporos, pero esta mejora en general es transitoria, particularmente en suelos degradados, con bajos contenidos de MO y baja estabilidad estructural (Dexter et al., 1984; Iglesias et al., 2010).

La información observada en la bibliografía sobre el efecto del pastoreo animal en sistemas de SD presenta variaciones entre situaciones estudiadas (Tabla 1). Lo cual es atribuible a la utilización de distintas técnicas, con metodologías y objetivos diferentes. Al presentarse situaciones con distintos grados de factores influyentes, se impide una extrapolación a otras situaciones bajo los mismos tratamientos. Para un análisis comparativo de la información con capacidad de extrapolarse a nuevas situaciones se debe tener un control, en el mayor grado posible, de los condicionantes que afectan la respuesta del cultivo. Los mismos deberían poder ser organizados a través de una jerarquización que indique su grado de importancia.

La relación existente entre RM, DA y contenido de agua en el suelo es dependiente de la textura. En suelos arenosos la DA es el principal atributo que condiciona los efectos de resistencia a la penetración, mientras que en suelos arcillosos el principal factor que determina o condiciona la RM es el contenido de agua (Mapfumo, 1997). Las experiencias revisadas sobre la capacidad de la textura de ser el factor primordial en la capacidad de compactación son diversas, en función de cada situación de estudio. En texturas pesadas con pastoreo directo sobre cultivos, se observaron efectos negativos en la mayoría de los casos (Taboada, 2007; Mapfumo 1997; Warren et al., 1986; Kiessling, 2012; Morán et al., 2000; Lanzasova et al., 2007; Zamora et al., 2006). En texturas Franco a Franco Arenosas también se observaron efectos

negativos sobre propiedades físicas (Franzluebbers et al., 2008; Venanzi et al., 2004; Scapini et al., 1997; Silva et al., 2010). No pudiendo atribuir el efecto negativo a un condicionante, la interacción entre más de un factor predisponente y las distintas metodologías utilizadas impiden determinar el grado de importancia de la textura como factor primordial en la compactación del suelo. Nuevamente su efecto debe estar enmascarado en la interacción con otros factores (humedad, cobertura, DA) no pudiendo obtenerse una conclusión clara.

Por lo tanto, para poder avanzar en el conocimiento de los efectos e interacciones de los procesos que repercuten en la compactación del suelo, se plantean las siguientes hipótesis de trabajo.

Tabla 1 - Resumen de trabajos en los cuales se observó el efecto del pastoreo de verdeos y/o rastrojos en rotaciones bajo SD. F: Franco; Fa: Franco arcilloso; FA: Franco Arenoso; FL: Franco Limoso; FaA: Franco arcillo Arenoso; V: Vacunos; Vq: vaquillonas; No: Novillo; SD: Siembra Directa; LR: Labranza Reducida; LC: Labranza Convencional; A: Avena; M: Maíz; S: Soja; Vi: Verdeo invierno; VV: Verdeo verano; RR: Rastrojos; CC: Cultivo cobertura; Ci: Cultivo invierno; G: Girasol; PP: Pastura permanente; SE: Sin efecto; CE: Con efecto negativo; NI: No indica

Autor	Año	Txt. Sup.	Duración	Animal	Labranzas	Rotacion	Pastoreo	Carga	Metodo de estudio	Efecto Prop. Suelos	Efecto Rinde
Scappino	1997	F	3 años	V	SD-LC	A/M	Vi	1000 kg/ha	Densidad aparente	Aumento en area pastoreada	SE
									Diametro medio agregados	Aumento en area pastoreada	
									Porosidad	Aumento de poros chicos, < macroporosidad	
Moran	1998	Fa	1 año	V	SD	(A\RYg)-Soja	Vi	150 animales/ha	Resistencia Penetración	Aumento a Siembra soja, reduccion posterior	SE
									Densidad aparente	Aumento a Siembra soja, reduccion posterior	
									Infiltrometria	Aumento a Siembra soja, reduccion posterior	
									Presencia Raices Soja	Sin Cambios	
									Biomasa Verdeos	Mayor en No pastoreados	
Diaz Zorita	2000	-	-	V	SD-LC	-	RR	-	Densidad aparente	Sin diferencias significativas.	-
Silva	2000	F	3 años	V	SD-LC	Vi/CV	Vi	-	Densidad aparente	Sin diferencias significativas.	SE
Esposito	2002	FA	3 años	V	SD-LC-LR	-	RR	-	Porosidad	Sin diferencias significativas.	SE
Krüger	2002	F	7 años	N	SD	T/G T/A/G	Vi	NI	Resistencia Penetración	Aumento resistencia a penetración en capa 0-20	CE en CV
									Infiltrometria	Disminución de la infiltración basica en un 50%	
Venanzi	2004	F	1 año	Vq	SD-LC	A/S	Vi	530 animales/ha	Densidad aparente	Aumento en capas superficiales	SE
									Resistencia Penetración	Aumento en capas superficiales	
Zamora	2006	F/Fa F/FA	2 años	V	SD	Vi/S	Vi	3 EV/ha	Resistencia Penetración	Aumento en primeros 5 cm	SE en CV CE en CI
									Densidad aparente	Sin diferencias significativas.	
									Contenido de Nitratos	Reducción nivel nitratos.	
									Densidad aparente	Aumento significativo	
Esposito	2007	F	13 años	V	SD-LC-LR	Pp/CV	RR-PP	-	Infiltrometria	Disminución significativa	SE
									Porosidad	Reducción poros <75 µm	
									Test de Proctor	Mayor Suceptabilidad compactación	
									Densidad aparente	Pequeño aumento en pastoreado	
Franzuebbers	2007	FA-FaA	2.5 años	V	SD-LC	CV/Cci/Ci	CC	NI	Estabilidad Macroagregados	Sin diferencias significativas.	-
									Resistencia Penetración	SD>LC sin diferencias entre P y NP	
									Infiltrometria	Leve reducción en pastoreado	
									Resistencia Penetración	Aumento Critico en suelo FL, no en FA	
Taboada	2007	F-FL	1 año	V	SD	M-S-aa-(MS)	R	NI	Infiltrometria	Disminucion en ambas txt, 31% FL, 62.8% FA.	SE
Lanzanova	2007	Fa	3 años	No	SD	Vi/ (S)Maiz)	Vi	1154 kg/ha 1640 kg/ha	Densidad aparente	Diferencias en 0-5 cm	SE
									Resistencia Penetración	Aumento significativo >2.5Mpa	
									Infiltracion	Disminución significativa	
Quiroga	2009	FA	5 años	No	SD	-	-	2 animales/ha	Densidad aparente	Aumento en capas superficiales	SE
									Estabilidad Estructural	Sin diferencias significativas.	
Fernandez	2010	FL	4 años		SD	M/S/M	RR	-	Densidad aparente	Sin diferencias significativas.	-
Souza	2010	A	1 año	Va	SD	Vi/S	Vi	-	Estabilidad Estructural	Aumento en sistemas con pastoreo	NI
Agostini	2012	Fa	2 años	V	SD-LC	T/M	RR T	4 animales/ha 12 animales/ha	Densidad aparente	Sin diferencias.	SE
									Resistencia Penetración	Aumento en 0-5 cm	
									Distribucion Raices	Sin diferencias significativas.	
Kiessling	2012	FA	6 años	Vq	SD-LC	Vv/T/Vi	Vv/Vi	200 animales/ha	Porosidad	>microporos,<Porosidad total,< Macro y meso poros	SE
									Densidad aparente	Sin diferencias significativas. SD no muestra diferencias, porosidad mas estable	

2 - HIPÓTESIS.

Bajo las condiciones productivas del sudoeste bonaerense, con pastoreo vacuno de verdes en siembra directa, se hipotetiza que:

- La textura influye en la compactación del suelo bajo pastoreo directo, suelos con mayor contenido de arcilla+limo, son más susceptibles a la compactación.
- Existe una interacción entre contenido de arcilla+limo, carga animal y reducción de la infiltración, aumento en la densidad aparente, reducción de la macroporosidad y aumento de la resistencia mecánica.
- El cultivo de sorgo presenta mejores condiciones que el cultivo de soja para su implantación y desarrollo como sucesor de un verdeo de invierno pastoreado debido a los diferentes mecanismos de germinación entre especies.

2.1 - OBJETIVOS GENERALES.

- Evaluar en diferentes texturas, el efecto de compactación del suelo provocado por el pastoreo directo animal en un verdeo invernal bajo SD.
- Analizar el efecto de distintas cargas animales en diferentes texturas, sobre distintos parámetros físicos indicadores de la compactación del suelo.
- Evaluar la implantación y desarrollo de cultivos sucesores al verdeo de invierno, en suelos de diferente textura y grado de compactación.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar la susceptibilidad a la compactación en texturas disimiles.
- Evaluar el efecto de distintas cargas animales para cada grupo textural.
- Determinar el grado de afectación a los cultivos de verano por el efecto del pastoreo.
- Observar el comportamiento de dos cultivos estivales (Sorgo y Soja) implantados sobre los verdeos pastoreados.

3 - MATERIALES Y MÉTODOS.

El estudio se realizó en el campo experimental de INTA Bordenave (37° 46' 05,7" S; 63° 5' 27,5" O). Se analizó la posibilidad de uso de distintos lotes, en búsqueda de un gradiente textural apropiado y de la superficie necesaria para el establecimiento del ensayo. Se muestreó la capa superficial (0-20 cm) en 6 lotes con historia agrícola-ganadera bajo SD, según su textura superficial indicada en la carta de suelos (1:10.000) (Gomez et al., 1981). Se determinó la composición granulométrica de las muestras obtenidas por el método de Bouyucos. En dos lotes preseleccionados por sus diferencias en el contenido de arcilla+limo, se realizó un análisis exploratorio con la sonda de electro-conductividad aparente (CE_a) EM-38MK2 (Geonics Limited, Ontario, Canadá), con el fin de detectar distintos gradientes texturales. La CE_a indica la habilidad que tiene un objeto para transmitir o conducir una corriente eléctrica (Lund et al., 1998). La conductancia del suelo se genera por tres vías paralelas: 1) Conductancia por medio de capas alternantes de partículas del suelo y entre los límites de sus soluciones; 2) Conductancia por medio de soluciones continuas en el suelo; 3) conductancia por superficies de partículas del suelo en contacto directo entre ellas. Esta última vía, estaría correlacionada con la conductividad eléctrica del suelo (CE), la textura y el contenido de agua en el suelo. Varios autores indicaron una buena relación entre los valores de CE_a y los contenidos de arcilla en el suelo (Domsch; Giebel, 2004; Sheets; Hendrickx, 1995; Carrol; Oliver, 2005).

La sonda presenta una bobina emisora junto a dos receptoras separadas a 0,5 m y 1 m (Doolittle; Brevik, 2014). Al circular corriente por la bobina emisora, el dispositivo induce en el suelo un campo magnético de baja frecuencia (H_p), el cual produce una corriente eléctrica y su correspondiente campo magnético secundario (H_s). Este segundo campo magnético genera una corriente eléctrica en respuesta, proporcional a la primera, pero atenuada por la resistencia eléctrica del suelo, el cual es censado por las bobinas receptoras. La relación H_p/H_s es linealmente proporcional a la conductividad aparente eléctrica del suelo (Carrol; Oliver, 2005). La posición de trabajo adoptada (Dipolo vertical) permitió obtener dos profundidades de muestreo 0,75 m y 1,5 m (Doolittle; Brevik, 2014). Para el presente trabajo se utilizaron los datos superficiales (0-75 cm) obtenidos del sensor, ya que presentan una mejor respuesta relativa a poca profundidad del suelo (Sudduth et al., 2001)

La sonda (EM38-MK2) fue utilizada durante la primera semana de Diciembre de 2013, ambos lotes estaban sin cultivos y malezas, con poca cobertura y bajo contenido

hídrico debido a las condiciones climatológicas en la época de estudio (altas temperaturas y bajas precipitaciones). El equipo fue montado sobre un bastidor de fibra de vidrio y arrastrado por una camioneta, realizándose transectas separadas cada 10-15 m. Los datos de CE_a fueron simultáneamente georreferenciados con un DGPS (Trimble 132, Trimble Navigation Limited, USA), configurado para tomar la posición terrestre por cada segundo (1 Hz).

Los datos obtenidos fueron analizados mediante el software R (R core Team, 2013), realizándose semivariogramas experimentales con posteriores interpolaciones para cada lote por el método de Kriging Ordinario. Los paquetes utilizados para dicho propósito fueron gstat (Pebesma, 2004), geoR (Diggle; Ribeiro, 2007) y sp (Pebesma; Bivand, 2005). El semivariograma es una función que cuantifica la correlación espacial entre puntos en el espacio, es decir su dependencia espacial (Vieira, 2000; Vieira et al., 2002).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Dónde:

$\gamma(h)$ = semivarianza estimada

$N(h)$ = número de pares de datos medidos, $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$.

h = vector distancia.

$Z(x_i)$ = valor de la variable de interés en el punto x_i

$Z(x_i + h)$ = valor de la variable de interés en el punto $x_i + h$

En la medida que exista auto correlación en el espacio, la semivarianza tiende a aumentar hasta un punto en el cual las observaciones se vuelven independientes, sin correlación.

El gráfico del semivariograma experimental presenta varios componentes de uso geoestadístico (Fig. 2):

Nugget (efecto pepita, C_0): indica el valor máximo de nula auto correlación, representando aquella variabilidad que no puede ser explicada por la densidad de muestreo utilizada.

Sill (Meseta, $C_0 + C_1$): corresponde al máximo valor de auto correlación, siendo el componente C_1 el de mayor interés, cuando este está dado en mayor porcentaje, de mayor utilidad serán las interpolaciones realizadas (Muñoz et al., 2006).

Range (Alcance): distancia máxima a la cual se obtiene el valor máximo de *Sill*. Dentro de esta distancia, la cual representa un radio, los valores están espacialmente

correlacionados y a partir de ella, la correlación entre variables es nula, siendo independientes unas de otras. (Morales, 2004; Giménez, 2009).

La obtención de estos valores permite ajustar los semivariogramas teóricos a los experimentales. El aumento de la semivarianza puede ser de diferentes formas (líneas, exponencial, gaussiano) la cual es necesario estimar para realizar correctas interpolaciones.

La mayoría de las variables del suelo tienen un comportamiento anisotrópico, es decir, la correlación espacial entre observaciones es diferente en las distintas direcciones estudiadas (Samper; Carrera, 1990), por lo cual, se analizaron semivariogramas omnidireccionales y direccionales. Para los semivariogramas direccionales el ajuste de los modelos teóricos no se evaluó a través de algún método estadístico (por imposibilidad del software), se estimó visualmente ajustando los modelos a los ángulos de búsqueda con mayor relación espacial.

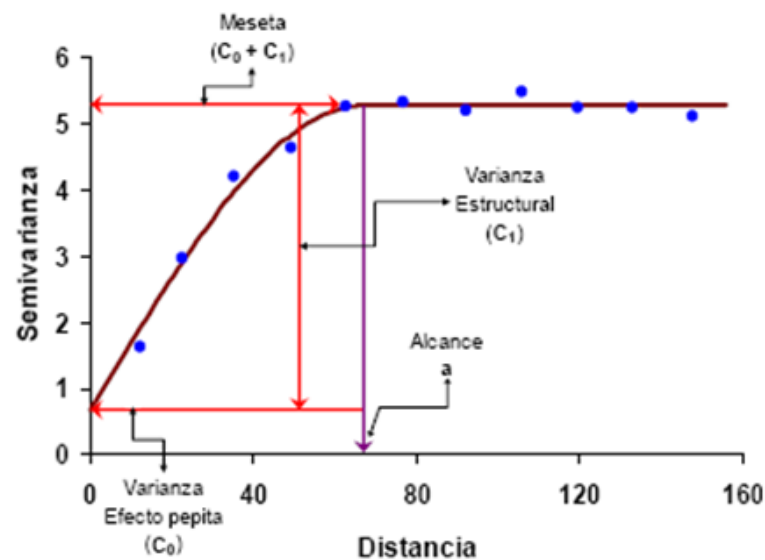


Figura 2 - Representación gráfica de un semivariograma teórico y sus partes constituyentes (Morales, 2004).

En el caso de los semivariogramas omnidireccionales se ajustó el modelo a través de la menor "Suma Cuadrado de Error" (SCE), siendo evaluados todos los modelos disponibles en el software. Ajustados los semivariogramas teóricos a los experimentales se procedió con la interpolación por Kriging.

El método de Kriging es un procedimiento geoestadístico que permite obtener valores en zonas desconocidas a través de datos reales espacialmente dispersos. Establece

pesos a las muestras que se encuentran alrededor del punto a estimar, a través de la estructura de covarianza detectada en el semivariograma, con el fin de asegurar que el promedio de error de estimación sea cero, con una varianza mínima, lo cual brinda una predicción no sesgada (Schloeder et al., 2001). Los pesos se obtienen resolviendo la siguiente ecuación (2):

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot \gamma[d(S_i, S_j)] + m = \gamma[d(S_o, S_i)] \quad i = 1, \dots, n; \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

$$\gamma[d(S_o, S_i) = \text{var}[Z(S_i) - Z(S_o)] \quad (2)$$

Dónde:

n: número de observaciones.

m: multiplicador de Lagrange.

λ : Pesos dado a cada observación.

S_i, S_j : Puntos muestreados (variable medida).

S_o : Punto en estimación.

$d(S_i, S_o)$ = distancia entre S_i y S_o a partir del semivariograma.

Una vez encontrado los pesos de los valores cercanos al punto a estimar, que minimicen la varianza del punto desconocido, se calcula el valor del nuevo punto.

$$Z^*(S_o) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(S_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (3)$$

Dónde:

$Z^*(S_o)$ = valor estimado.

n= número de observaciones vecinas usadas para la estimación.

λ_i = peso asignado al valor observado $Z(S_i)$.

Confeccionado los mapas de electro-conductividad, se realizó un muestreo al azar estratificado, seleccionado tres sitios contrastantes de CE_a tomando 10 puntos de muestro en ambos lotes seleccionados. En cada punto se obtuvieron muestras cada 20 cm hasta el metro o hasta la profundidad en que se detectó la presencia de tosca.

Se realizaron determinaciones de MO (Walkley; Black, 1934), fósforo disponible (Bray; Kurtz, 1945), pH (1:2.5), CE (1:2.5), capacidad de intercambio catiónico (CIC), Calcio (Ca, meq.100 gr suelo⁻¹) y Magnesio (Mg, meq 100 gr suelo⁻¹) por Complejidad con EDTA, Sodio (Na, meq 100 gr suelo⁻¹), Potasio (K, meq. 100 gr suelo⁻¹) con

Espectrofotómetro de llama y Suma de Bases (SB, meq. 100 gr suelo⁻¹) según lo descrito en Helmke y Sparks (1996), también se determinó textura por el método de la pipeta de Robinson (% arcilla, arena y limo) para el horizonte superficial (0-20 cm). En los casos donde se observó alta concentración de carbonatos se realizó previamente la eliminación de los mismos. Se elaboró un muestreo en grilla de 20x20 m donde se cuantificó la profundidad a la tosca mediante una sonda mecánica. Las relaciones entre el conjunto de variables a explorar y los valores de CE_a fueron obtenidos a través de regresiones simples para cada una de las variables y regresiones múltiples en algunos casos. La relación existente entre los parámetros del suelo y el mapa de CE_a fue utilizada para la elección de un lote a utilizar en el experimento, y para determinar zonas de distinta granulometría donde establecer los ensayos.

Sobre el lote seleccionado se sembró, Centeno (*Secale cereale*) + Vicia (*Vicia villosa* Roth.) a razón de 45 y 10 kg ha⁻¹, respectivamente. El diseño experimental utilizado fue en bloques completos aleatorizados, siendo Textura y Carga Animal los factores principales, se consideró a los bloques como un efecto aleatorio anidado en las distintas texturas. Para el caso de RM y DA, se consideró las muestras obtenidas en distintas profundidades como medidas repetidas en el espacio. Para todas las propiedades físicas analizadas se realizaron medidas previas al establecimiento del ensayo y después de aplicados los tratamientos, para las cuales se analizó la diferencia entre los valores medios obtenidos para cada indicador (Δ : Pospastoreo – Prepastoreo). Diferencias entre medias fueron calculadas a través del test de Tukey ($\alpha_e=0,05$).

Se utilizaron tres tratamientos con tres repeticiones, dados por tres niveles de carga animal:

- Testigo: 0 cabezas.día.ha⁻¹ (TES).
- Carga moderada: 200 cabezas.día.ha⁻¹ (MOD).
- Carga pesada: 400 cabezas.día.ha⁻¹ (PES).

El tamaño de las parcelas utilizado fue de 392 m². Las categorías de animales utilizados fueron vacas de cría (450 kg animal⁻¹).

Las mediciones realizadas en forma previa y posterior a los pastoreos fueron:

-Resistencia mecánica:

Se utilizó un penetrómetro de cono (CN-970, SOILTEST Inc., Lake Bluff, Illinois) (Bradford, 1986), tomándose tres observaciones por parcela a las profundidades de 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm y 15-20 cm. Para verificar similar contenidos de humedad en distintos momentos de muestro, los contenidos de humedad en las parcelas testigo fueron comparados mediante el test-t de Welch.

-Densidad aparente:

Mediante el método del cilindro (Blake; Hartge, 1986), se extrajeron tres muestras por parcela para cada una de las profundidades estudiadas, las cuales fueron iguales a las analizadas en la RM.

-Conductividad Hidráulica (K(h)):

A través de infiltrómetros de tensión a disco (Perroux; White, 1988), en tres tensiones (0, 1,5 cm, 3 cm) con tres repeticiones por parcela. Se estimaron los valores de conductividad hidráulica saturada (K(0)) según la ecuación de Wooding (1968) (4).

Wooding establece una aproximación algebraica para una tasa de infiltración a flujo instaurado constante dentro del suelo partiendo de una fuente circular.

$$Q = \pi \cdot r^2 \cdot K(0) \cdot \left(1 + \frac{4}{\pi \cdot r \cdot \alpha}\right) \quad (4)$$

Donde, Q: volumen de agua entrando al suelo (cm³ h⁻¹), K(0): conductividad hidráulica saturada (cm h⁻¹), r: radio (cm). Por otro parte, Gardner (1958), propone una relación exponencial para la conductividad hidráulica a distintas tensiones.

$$K(h) = K(0) \cdot \exp(\alpha \cdot h) \quad (5)$$

En la cual K(h) es la conductividad hidráulica a una tensión dada, K(0) la conductividad hidráulica saturada, α es una constante y h es la tensión a estimar la K.

Reemplazándose la Ecuación 4 en 5 permite obtener la ecuación de flujo de agua dentro del suelo en función de la tensión aplicada (Wooding, 1968).

$$Q(h) = \pi \cdot r^2 \cdot K(0) \cdot \exp(\alpha \cdot h) \left[1 + \frac{4}{\pi \cdot r \cdot \alpha}\right] \quad (6)$$

Dónde: Q es la infiltración promedio en $\text{cm}^3 \text{h}^{-1}$, $K(0)$ la conductividad hidráulica saturada, α es una constante, h es la tensión de medición y r es el radio del disco del infiltrómetro.

Se realizó un ajuste no lineal de los valores de infiltración en sus tres tensiones a dicha ecuación, permitiendo estimar $K(0)$ y α . Se utilizó la función nls del software R, para tal propósito. Con los valores de $K(0)$ obtenidos, se calculó $K(-3)$ y $K(-1,5)$, según ecuación 5.

-Curva de retención de agua (CRA) y macroporosidad (MACRO):

La CRA y MACRO fue calculada hasta los 56 cm de tensión. Se tomaron tres muestras sin disturbar de la capa 0-5 cm por parcela con cilindros de 98 cm^3 . Las tensiones utilizados para esta determinación fueron: 1,5 cm; 3 cm; 7 cm; 14 cm; 28 cm y 56 cm ($p_f = 0,18; 0,48; 0,85; 1,15; 1,45; 1,75$), las cuales corresponden a un diámetro de poro de $1866 \mu\text{m}; 933 \mu\text{m}; 400 \mu\text{m}; 200 \mu\text{m}; 100 \mu\text{m}$ y $50 \mu\text{m}$, respectivamente. La relación entre tensión y diámetro de poro fue determinada por la siguiente expresión (Imhoff et al., 2010).

$$r = - (2. \delta. \cos \alpha) / (p. g. h) \quad (7)$$

Donde, δ es la tensión de agua superficial, α es el ángulo de contacto entre el agua y la pared del poro, p la densidad del agua, g la aceleración de la gravedad y h : corresponde a la tensión aplicada.

Previamente las muestras fueron saturadas durante 48 hs llevándolas posteriormente a la mesa de tensión. Una vez alcanzado el equilibrio para cada tensión, se procedió a pesar las muestras y continuar con la siguiente tensión. Finalizada las mediciones, las muestras fueron llevadas a estufa ($105 \text{ }^\circ\text{C}$) para obtener su peso seco (PS). Se utilizó el método de cálculo descrito por Oliveira (1968) (8) para obtener los contenidos hídricos a cada tensión evaluada. La macroporosidad fue estimada a través de la diferencia con la porosidad total de la muestra (8).

$$CRA(h) = \frac{PH(h)}{100} gr \text{ suelo} - \frac{PS}{100} gr \text{ suelo}$$

$$Macro(h) = \frac{(2.65 - DA)}{2.65} - \frac{PH(h) - Tara - PS}{Vol. Cilindro} \quad (8)$$

Donde CRA es la retención de agua a una tensión dada, Macro la macroporosidad a la tensión h , $PH(h)$ es el peso húmedo a la tensión h , PS es el peso seco, y DA es la densidad aparente.

Previo al segundo pastoreo se determinó biomasa aérea del verdeo a través de un aro de $0,25 \text{ m}^2$, tomándose tres muestras por parcela. También se determinó el contenido de agua en el suelo cada 20 cm hasta los 80 cm de profundidad.

Terminado los pastoreos y posterior al muestreo de suelos, se tomaron muestras para determinar Nitrógeno disponible (Bremner; Keeney, 1966) (0-60 cm), Agua total (0-80 cm), Nitrógeno anaeróbico (Gianello; Bremner, 1986) (0-20 cm) y MO (0-20 cm) (Walkey; Black, 1934). Posteriormente se sembraron dos cultivos de verano en franjas divididas, sobre los tratamientos. Se utilizó: sorgo granífero (*Sorghum bicolor L.*), híbrido GEN210 y soja (*Glycine max*) cultivar DON MARIO 3810, con una densidad de siembra de 6,2 kg y 65 kg, respectivamente. Sobre los cultivos se analizó el efecto sobre la implantación (número de plantas emergidas) durante los 62 días posterior a la siembra. En el estadio V8 del cultivo de Sorgo se cosecharon 10 plantas por parcela para determinar: biomasa área temprana, altura, número de macollos, número de hojas y proteína. A cosecha se estimó materia seca en planta entera, materia seca espiga (sorgo) y peso de granos, en 3 metros lineales por parcela.

Se analizó la relación entre los valores de CE_a con distintas propiedades del suelo: agua disponible, MO, Nitrógeno disponible, Nan, DA, RM, $K(h)$ a través del uso de regresiones lineales y múltiples.

4 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 - Selección del lote.

El análisis preliminar permitió identificar dos sitios con texturas contrastantes, denominados Sitio 4 (S4) y Sitio 6 (S6). Los contenidos de limo+arcilla obtenidos por el método de Bouyucos, fueron cercanos al doble para el S4 (64%) con respecto al S6 (34%).

Se obtuvieron 7302 puntos CE_a para el S6 con una media de $9,12 \text{ mS m}^{-1}$, y un desvío estándar de $2,13 \text{ mS m}^{-1}$. Para el S4 se lograron 10.874 puntos, la media se encontró en $12,02 \text{ mS m}^{-1}$, con un desvío del $3,20 \text{ mS m}^{-1}$, observándose una mayor cantidad de datos extremos para dicho lote (Tabla 2).

Tabla 2. Valores resúmenes de CE_a (mS m^{-1}) para ambos lotes evaluados.

Sitio	Media	Desvió Estándar	CV	Rango intercuartil					n
				0%	25%	50%	75%	100%	
S4	12,03	3,29	0,27	6,6	9,9	11,6	13,2	94,8	10874
S6	9,13	2,13	0,23	4,4	7,4	8,7	10,5	19,7	7302

Dado a una baja presencia de valores extremos, no se realizaron eliminaciones ni transformación de datos preexistentes. En la figura 3 se muestra el ajuste de los semivariogramas para cada lote con distintos ángulos de búsqueda. Para ambos casos el valor Nugget fue muy bajo, indicando una buena densidad de observaciones. En los semivariogramas direccionales, para el lote S4, la función de semivariograma ajustada fue Mattern con parametrización de Stein (Mattern Ste), con un alcance de 15,9 m. Siendo utilizada la función lineal para el lote S6 con una distancia mayor (79,6 m). Los semivariogramas omnidireccionales utilizaron para ambos lotes el modelo Mattern Ste., presentando bajos valores de Nugget, teniendo un alcance de 39,2 m y 95,7 m para los sitios 4 y 6 respectivamente.

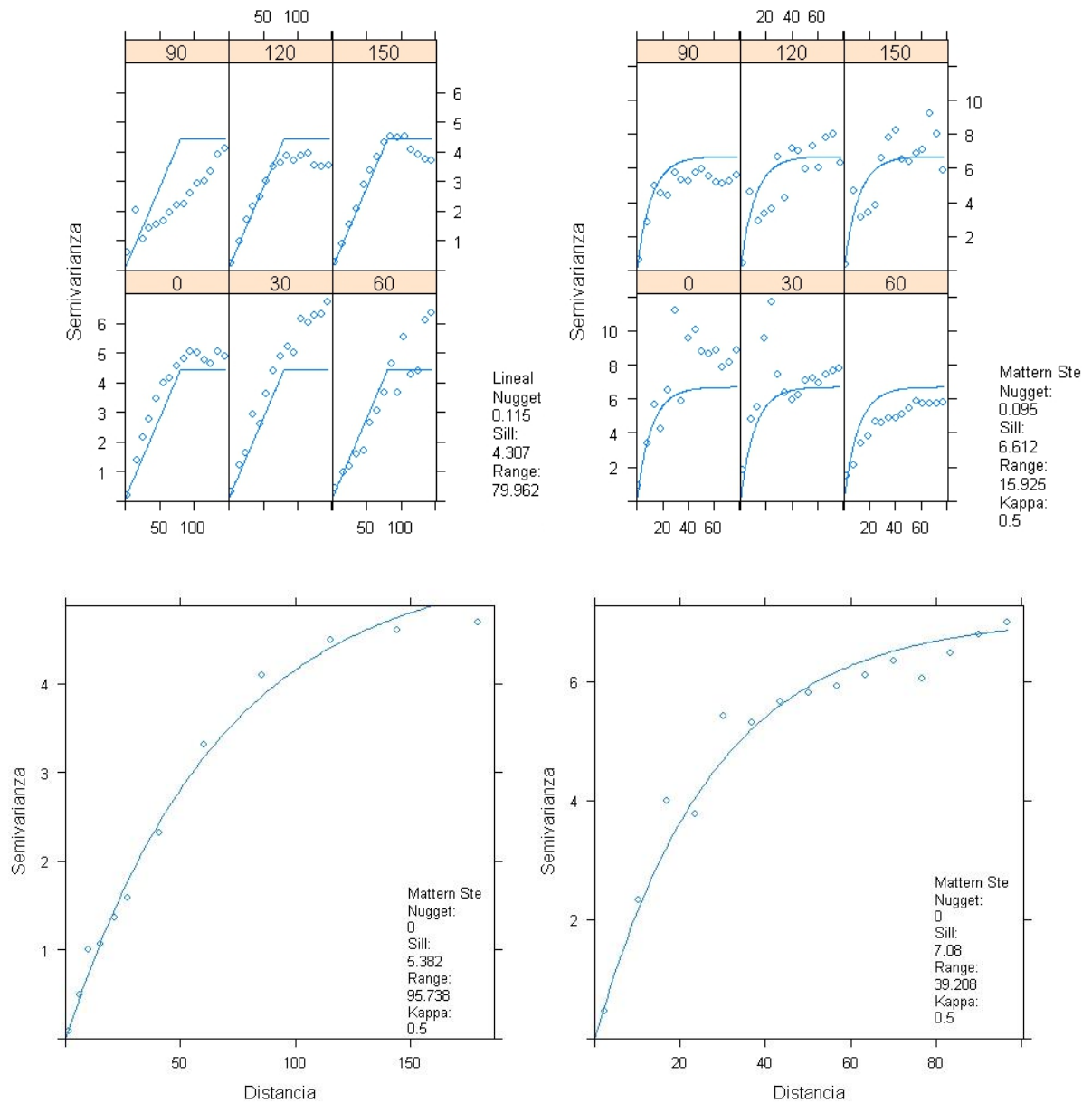


Figura 3 – Superior, semivariogramas direccionales para CEa, izquierda S6, derecha S4. Inferior, izquierda: semivariograma omnidireccionales para el lote S6, derecha: semivariograma omnidireccional para el lote S4.

4.1.1 - Resultados de la evaluación del sitio 4.

Los 10 sitios seleccionados pudieron ser muestreados hasta el metro de profundidad, salvo 2 puntos donde se constató la presencia de un horizonte calcáreo masivo. El S4 presentó las mayores diferencias en valores de CE_a . Las interpolaciones por semivariogramas omnidireccionales y/o direccionales no mostraron diferencias en las zonas de CE_a conformadas.

El conjunto de variables estudiadas en la capa 0-20 cm no permitió explicar los valores de CE_a . Se observaron tendencias positivas entre los contenidos de CE_a y los niveles de Na^+ en el complejo de intercambio, sin llegar a ser de significancia estadística. Los valores de CE_a tuvieron una baja relación con los contenidos de arcilla+limo (a+L) ($R^2 = 0.0005$), imposibilitando el uso del lote para el establecimiento del ensayo (Tabla 3). Para la forma de trabajo adoptada el EM38-MK2 presenta una sensibilidad hasta los 75 cm de profundidad, la presencia de capas sub-superficiales con alto contenido de sales o cambios marcados en su textura, pueden generar diferencias marcadas entre los valores de CE_a , impidiendo separar horizontes superficiales con distintos grupos texturales. La inclusión de capas más profundas podría explicar los niveles de CE_a detectados por la sonda.

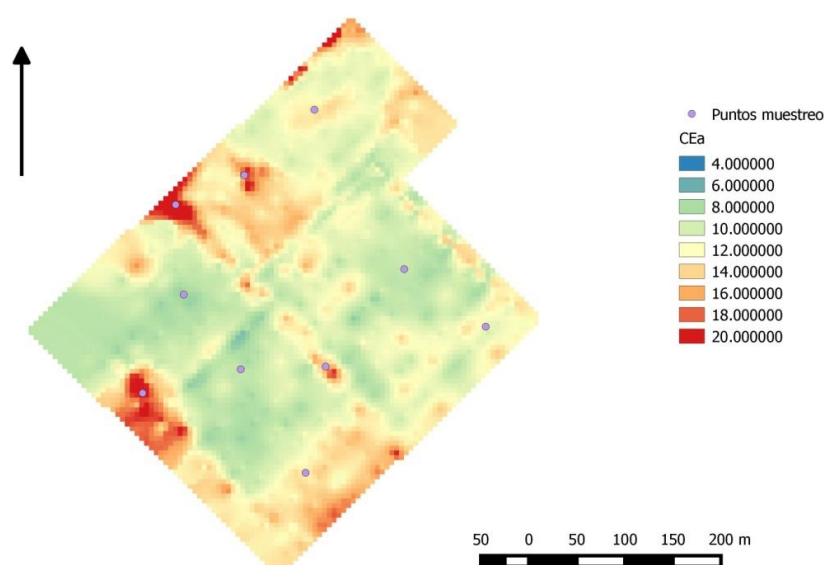


Figura 4 - Mapa originado por kriging ordinario para el sitio 4. Se muestra el mapa obtenido con el uso del semivariograma direccional.

4.1.2 - Resultados de la evaluación del Sitio 6.

El S6 presentó menores valores de CE_a , no se constató la presencia de horizontes masivos, posibilitando tomar muestras hasta el metro de profundidad. Los valores de CE_a presentaron una buena correlación con los contenidos de a+L ($R^2=0,83$) pudiendo identificar tres texturas en un rango lineal. También se observó una buena correlación con los contenidos de MO, previsiblemente por la buena relación con los grupos texturales (Tabla 4). Existiendo una menor relación con los valores de pH ($R^2 = 0,53$).

Las texturas encontradas fueron Arenosa Franca (AF), $CE_a < 8 \text{ mS m}^{-1}$, Franco Arenosa (FA), $8 \text{ mS m}^{-1} < CE_a < 12 \text{ mS m}^{-1}$ y Franco arcilla Arenosa (FaA), $CE_a > 12 \text{ mS m}^{-1}$. Los valores limites encontrados deben ser validados con nuevos set de datos, medidos en condiciones similares a las ocurridas en este ensayo, de baja disponibilidad hídrica, debido al cambio en los valores absolutos de CE_a por diferencias de humedad (Carrol; Oliver, 2005). En dicho gradiente textural y con el uso del mapa de CE_a se instalaron las parcelas para los distintos tratamientos.

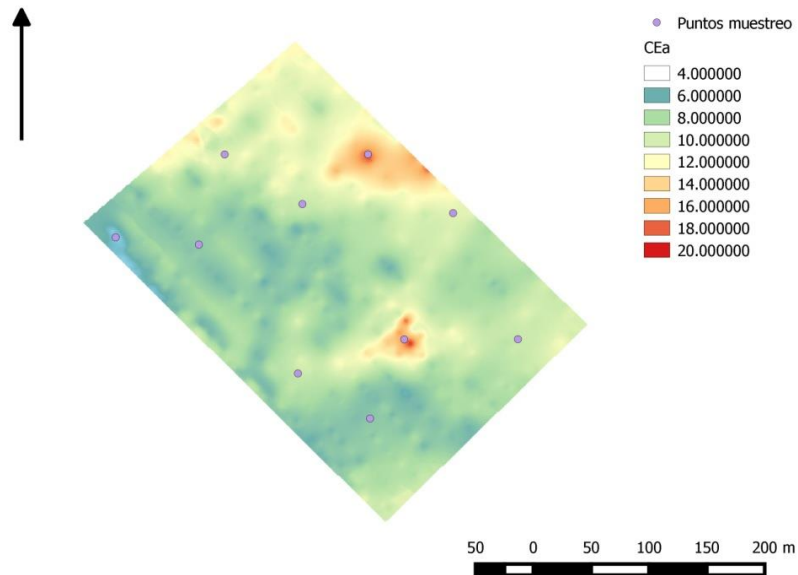


Figura 5 - Mapa de CE_a para el sitio S6. Se muestra el mapa obtenido con el uso de semivariograma direccional.

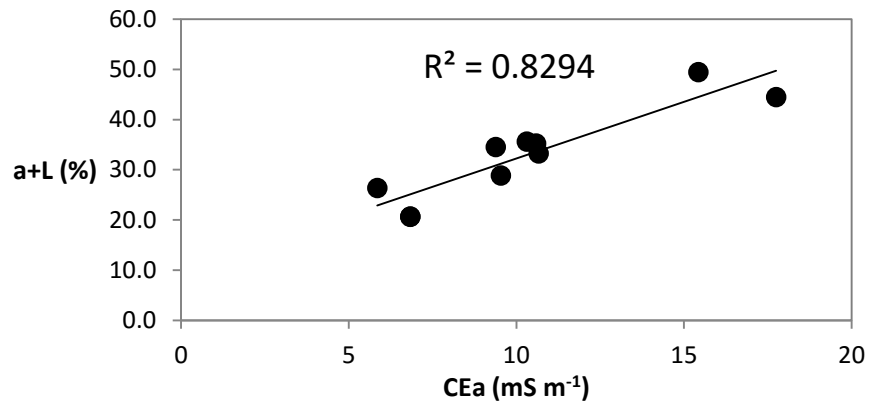


Figura 6 - Relación entre CEa y los contenidos de a+L (en porcentaje) para 10 puntos de muestreo en el sitio 6.

Tabla 3. Coeficiente de correlación de Pearson y niveles de significancia para las distintas propiedades evaluadas en el S4 (0-20 cm), ns: diferencias no significativas, * diferencias significativas ($p < 0,05$), *** diferencias muy significativas ($p < 0,01$), a+L: contenido de limo + arcilla. PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, Ce a: Conductividad eléctrica aparente.

	Sitio 4																
	Ce a	MO	P	pH	CE	Arena	Limo	Arcilla	a+L	Profundidad	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	C.I.C.	PSI	SB
Ce a	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MO	0,14	1,00	ns	ns	ns	*	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns
P	0,04	-0,06	1,00	***	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
pH	0,07	-0,07	-0,97	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns
CE	-0,20	0,58	-0,16	-0,01	1,00	***	ns	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns
Arena	0,11	-0,70	0,31	-0,09	-0,83	1,00	*	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns
Limo	-0,10	0,55	-0,59	0,46	0,36	-0,69	1,00	ns	*	ns	***	ns	ns	ns	ns	ns	***
Arcilla	-0,01	0,15	0,38	-0,50	0,55	-0,34	-0,45	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
a+L	-0,11	0,70	-0,31	0,09	0,83	-1,00	0,69	0,34	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	***	ns	ns
Profundidad	-0,22	0,26	0,37	-0,48	0,31	-0,40	0,01	0,49	0,40	1,00	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns
Ca ²⁺	-0,25	0,36	-0,71	0,61	0,23	-0,55	0,80	-0,36	0,55	0,11	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	***
Mg ²⁺	0,00	0,48	0,76	-0,86	0,22	-0,29	-0,09	0,48	0,29	0,70	-0,29	1,00	ns	ns	ns	ns	ns
Na ⁺	0,51	0,10	0,01	-0,01	-0,20	-0,18	0,32	-0,19	0,18	0,34	0,08	0,28	1,00	*	ns	***	ns
K ⁺	0,39	-0,35	0,42	-0,32	-0,50	0,30	-0,11	-0,22	-0,30	0,29	-0,27	0,27	0,77	1,00	ns	***	ns
C.I.C.	-0,06	0,77	-0,23	0,02	0,89	-0,97	0,63	0,37	0,97	0,35	0,39	0,35	0,14	-0,34	1,00	ns	ns
PSI	0,56	-0,06	0,08	-0,05	-0,35	0,00	0,16	-0,20	0,00	0,28	-0,03	0,22	0,98	0,85	-0,05	ns	ns
SB	-0,21	0,35	-0,66	0,57	0,19	-0,55	0,82	-0,38	0,55	0,17	0,99	-0,23	0,19	-0,15	0,39	0,08	1,00

Tabla 4. Coeficiente de correlación de Pearson y niveles de significancia para las distintas propiedades evaluadas en el S6 (0-20 cm), ns: diferencias no significativas, * diferencias significativas ($p < 0,05$), *** diferencias muy significativas ($p < 0,01$), a+L: contenido de limo + arcilla, PSI: porcentaje de sodio intercambiable, SB: saturación de bases, Ce a: Conductividad eléctrica aparente.

		Sitio 6																
		CE a	MO	P	pH	CE	Arena	Limo	Arcilla	a+L	Profundidad	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na+	K+	C.I.C.	PSI	SB
CE a		1,00	***	ns	*	ns	***	***	***	***	ns	***	ns	***	ns	ns	ns	*
MO		0,84	1,00	ns	*	ns	***	***	***	***	ns	***	ns	***	ns	*	ns	***
P		-0,44	-0,32	1,00	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
pH		0,73	0,67	-0,73	1,00	ns	***	***	*	***	ns	***	ns	ns	ns	*	ns	***
CE		0,16	0,28	0,10	0,28	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns	ns	ns
Arena		-0,92	-0,95	0,44	-0,78	-0,34	1,00	***	***	***	ns	***	ns	***	ns	*	ns	***
Limo		0,92	0,92	-0,42	0,80	0,28	-0,98	1,00	***	***	ns	***	ns	***	ns	ns	ns	***
Arcilla		0,83	0,93	-0,44	0,69	0,42	-0,95	0,86	1,00	***	ns	***	ns	*	ns	*	ns	***
a+L		0,92	0,95	-0,44	0,78	0,34	-1,00	0,98	0,95	1,00	ns	***	ns	***	ns	*	ns	***
Profundidad		-0,43	-0,17	0,25	-0,42	-0,10	0,37	-0,40	-0,28	-0,37	1,00	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ca ²⁺		0,80	0,82	-0,67	0,95	0,24	-0,86	0,86	0,80	0,86	-0,25	1,00	ns	*	ns	*	ns	***
Mg ²⁺		0,22	0,40	0,11	-0,07	0,57	-0,38	0,24	0,56	0,38	0,02	0,02	1,00	ns	ns	ns	ns	ns
Na+		0,78	0,85	-0,37	0,51	0,13	-0,80	0,79	0,74	0,80	-0,01	0,66	0,41	1,00	ns	ns	ns	ns
K+		-0,10	0,04	0,08	0,00	0,65	-0,05	-0,11	0,30	0,05	-0,21	-0,01	0,58	-0,22	1,00	ns	*	ns
C.I.C.		0,43	0,67	-0,62	0,71	0,39	-0,65	0,57	0,71	0,65	-0,25	0,74	0,31	0,51	0,40	1,00	***	***
PSI		0,15	-0,14	0,38	-0,30	-0,37	0,11	0,00	-0,27	-0,11	0,19	-0,26	-0,21	0,09	-0,67	-0,78	1,00	ns
SB		0,76	0,83	-0,61	0,90	0,43	-0,87	0,82	0,88	0,87	-0,29	0,96	0,24	0,62	0,27	0,84	-0,42	1,00

4.1.3 - Relaciones entre CE_a y propiedades del sitio 6.

Durante el desarrollo del experimento se pudieron establecer una serie de relaciones entre las variables estudiadas y los valores de CE_a . Las principales relaciones se dieron con el contenido de agua al 1º pastoreo ($R^2=0,82$), 2º pastoreo ($R^2=0,89$), y siembra de los cultivos de verano ($R^2=0,81$) (Fig. 7), lo cual ha sido informado por otros autores (Misra; Padhi, 2014; Kachanoski et al., 1990). Este hecho es favorecido por la presencia de un perfil homogéneo sin grandes discontinuidades (Gomez et al., 1981), en este aspecto, el sondeo en profundidad del suelo no detectó la presencia de horizontes masivos hasta 1 m de profundidad, siendo limitada la capacidad de retención de agua principalmente por la textura del suelo. No se observaron relaciones con nitrógeno disponible a la siembra de los cultivos verano, pero si con los niveles de Nan ($R^2=0,46$), y MO% ($R^2=0,48$).

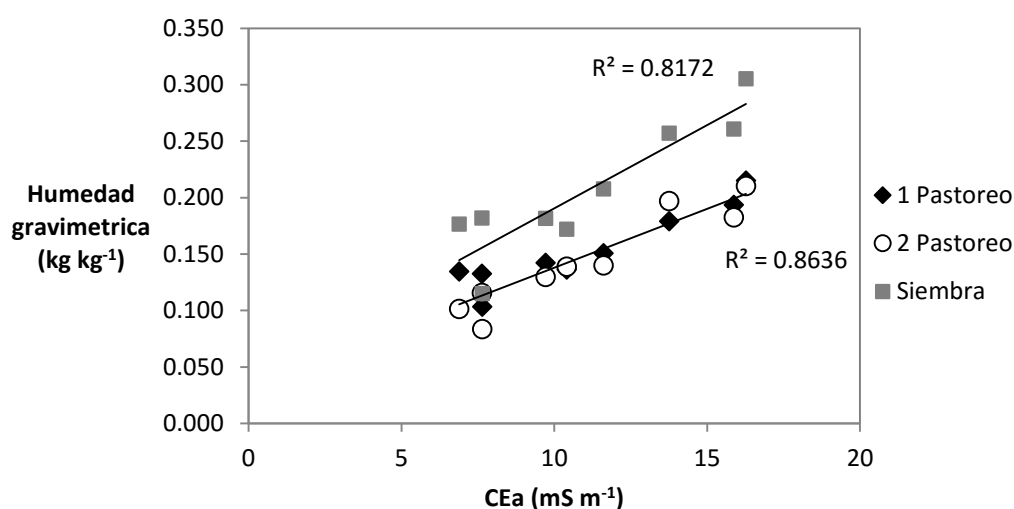


Figura 7 - Relación entre los valores de CE_a y los contenidos gravimétricos de agua promedio en el perfil (0-80 cm) en las parcelas testigos, previa a los pastoreos y a la siembra.

4.2 - Condiciones meteorológicas durante el ensayo.

Las precipitaciones ocurridas durante el periodo de estudio se muestran en la figura 8. En el año 2014 (967,5 mm) las precipitaciones fueron 44% superiores a la media histórica de la estación experimental (670,9 mm), durante el periodo estival 2015 hubo un aumento del 53%, dado principalmente por un pico de precipitaciones en Enero (223 mm). En ambos momentos de pastoreo y siembra, el suelo se encontraba cercano a capacidad de campo. Las buenas condiciones climáticas permitieron

realizar 2 pastoreos previo al inicio del barbecho de verano. El contenido de agua del suelo para los tres niveles texturales y diversos momentos del estudio se presentan en la tabla 5.

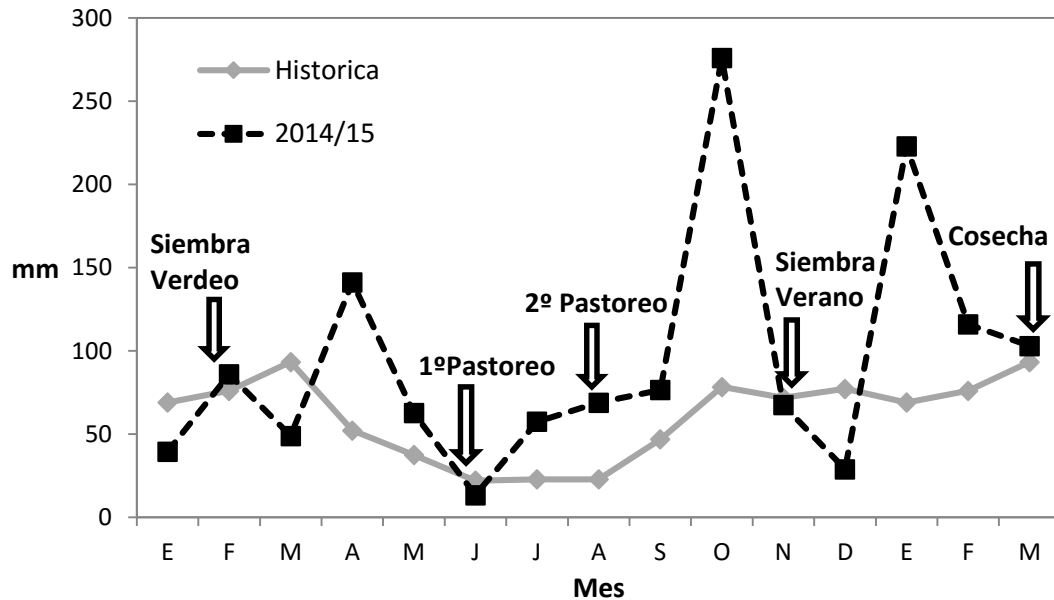


Figura 8 - Evolución de las precipitaciones (mm) durante el periodo de estudio.

Tabla 5. Contenidos de humedad gravimétricos promedios ($\text{kg agua kg suelo}^{-1}$) para distintos momentos de muestreo, en el perfil (0-80 cm) y en el horizonte superficial (0-20 cm) en paréntesis se indica el porcentaje de la capacidad de campo alcanzada.

Textura	Profundidad					
	0-80 cm			0-20 cm		
	1 pastoreo	2 pastoreo	Siembra	1 pastoreo	2 pastoreo	Siembra
AF	0,12	0,10	0,15	0,13 (130%)	0,09 (89%)	0,14 (140%)
FA	0,14	0,13	0,18	0,14 (115%)	0,10 (84%)	0,15 (119%)
FaA	0,19	0,19	0,27	0,17 (122%)	0,14 (102%)	0,19 (136%)

4.3 - Biomasa del Verdeo

Un ataque de oruga militar, (*Spodoptera frugiperda*), posterior a la emergencia del cultivo de invierno afectó gran número de parcelas, imposibilitando la toma de muestras para MS y obligando a resembrar gran parte del lote. Posteriormente, tanto en la reimplantación del cultivo como luego del pastoreo no se encontraron diferencias atribuibles a los tratamientos en la producción de biomasa. No observándose relación con las distintas propiedades del suelo evaluadas.

4.4 - Propiedades físicas edáficas.

4.4.1 - Densidad aparente.

Se observaron diferencias estadísticamente significativas de DA posterior a los pastoreos entre tratamientos y texturas, existiendo interacción significativa ($p < 0,01$). Las profundidades solo tuvieron interacción con textura ($p < 0,01$), sin haber efectos combinados con los distintos tratamientos. La Tabla 6 muestra los valores medios de DA posteriores al pastoreo y ΔDA , en función de la carga animal.

La interacción Tratamiento:Textura muestra que para la textura AF, el tratamiento PES se diferenció de los restantes, sin existir diferencias entre las restantes texturas para los distintos tratamientos. Los valores medios para los tratamientos post-pastoreo fueron 1,31; 1,31; 1,34 Mg m^{-3} para MOD, TES y PES, respectivamente.

La ΔDA , mostro diferencias significativas entre tratamientos, existiendo interacción Textura:Tratamiento, no observándose efectos en las distintas profundidades.

Tabla 6. Valores medios de DA (Mg m^{-3}) para la capa 0-20 cm, posterior a los pastoreos y la diferencia entre valores observados Pospastoreo - Prepastoreo (ΔDA). Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos

	DA – Pospastoreo					
	AF		FA		FaA	
Testigo	1,35	a	1,34	a	1,26	a
Moderado	1,36	a	1,34	a	1,24	a
Pesado	1,43	b	1,37	a	1,23	a
$\Delta DA(\text{Pospastoreo} - \text{Prepastoreo})$						
	AF		FA		FaA	
Testigo	-0,0057	a	0,0184	a	0,0314	a
Moderado	-0,0148	a	0,0284	a	0,0220	a
Pesado	0,0713	b	0,0500	b	0,0218	a

La Fig. 9 muestra la variación de la DA con la profundidad para las tres texturas estudiadas (interacción Textura:Profundidad). Se observaron menores valores de DA en todo el perfil para la textura FaA, y similares valores en la capa 0-10 cm para las texturas AF y FA. El pisoteo animal no produjo efectos significativos a distintas profundidades, siendo los contenidos texturales los que determinaron las diferencias de DA en las distintas capas evaluadas.

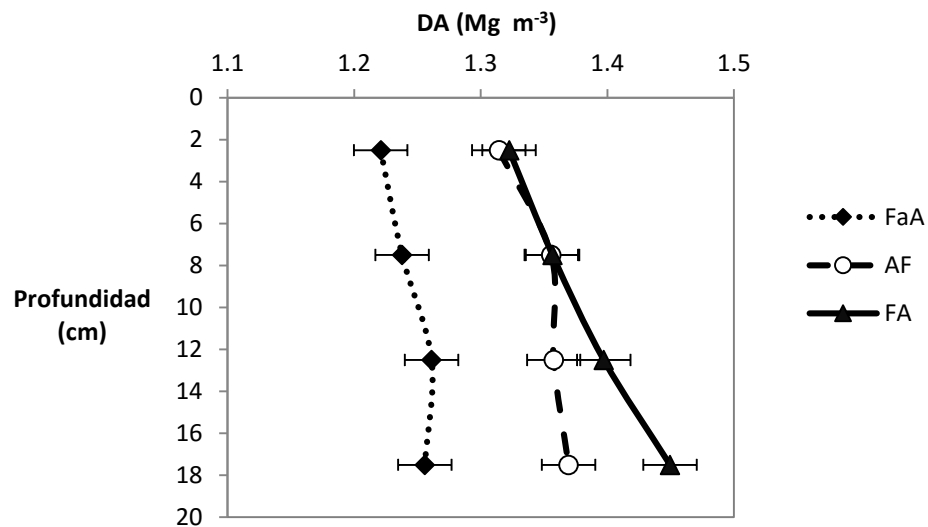


Figura 9 - Valores de DA posterior a los pastoreos para las distintas texturas evaluadas en las capas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm. AF: Arenoso Franco, FA: Franco Arenoso, FaA: Franco arcillo Arenoso.

El pastoreo produjo un aumento de la DA del suelo en la textura más gruesa bajo la mayor carga. Aun así, los valores obtenidos no llegan a ser cercanos a los valores críticos que limita el crecimiento de las plantas. Daddow y Warrington (1983), desarrollaron un sistema para estimar valores críticos de densidad aparente en relación a las clases texturales. Para los contenidos de a+L estudiados, la DA crítica sería de 1,76; 1,70; y 1,63 Mg m⁻³ para las texturas AF, FA, FaA, respectivamente, valores muy superiores a los observados en el presente trabajo.

Los cambios en DA son un indicador global de los espacios existentes en el suelo, sin dar información sobre la distribución de estos espacios, su conectividad, o cambios en la conectividad (Alaoui et al., 2011). Una falta de sensibilidad de este indicador para detectar cambios en el transporte de agua y solutos en el suelo fue reportado por otros autores (Gebhardt et al., 2009; Horn et al., 2003; Lipiec; Hatano, 2003). Una de las formas de solucionar este problema es relacionar los valores de DA a un valor máximo de DA, obtenido a través de un test de compactación estandarizado (Håkansson et al., 2000). En la tabla 6 se pueden observar los valores de DA en relación a su estado previo al ensayo (en forma de diferencia). Un valor positivo indica un estado de mayor densificación del suelo luego de implementar los diferentes tratamientos de carga animal. Los resultados obtenidos por este método son similares a los observados en el análisis estadístico post-pastoreo, diferenciándose para este análisis, el tratamiento PES bajo la textura FA y AF.

La menor sensibilidad de la textura más fina (FaA) puede darse por sus mayores contenidos de MO y el efecto amortiguador que provoca este incremento. Diaz Zorita y Grosso (2000) determinaron que altos contenidos de MO reducen los efectos de densificación del suelo independientemente de la clase textural.

La relación con los contenidos de MO puede enmascarar efectos de los tratamientos (Håkansson et al., 2000). Arvitson (1998) observó en experiencias a campo, que el efecto del cambio de la DA por tránsito vehicular, estaba inversamente relacionado con el contenido de MO del suelo y directamente con el contenido de arena.. Dicha relación fue observada para el tratamiento PES, donde se observó una tendencia a separarse las pendientes de las regresiones entre momentos de muestreo para DA y MO. Aun así, dichas pendientes no presentaron diferencias significativas ($p=0,27$) (Fig. 10).

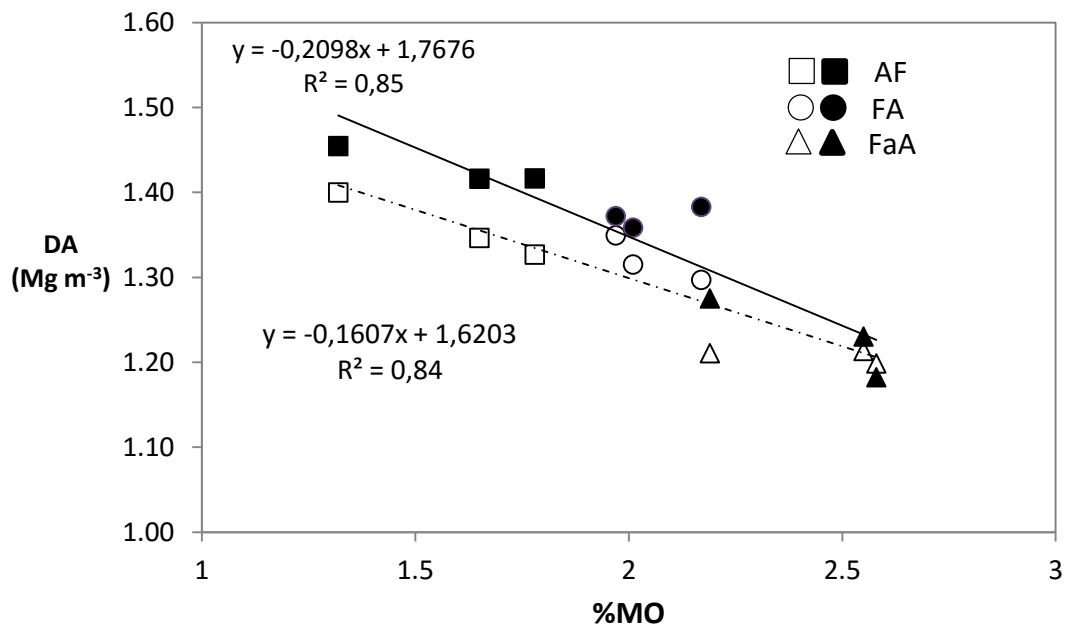


Figura 10 - Relación entre los valores medios de DA (Mg m^{-3}) y MO (%) para las 9 parcelas del tratamiento con mayor carga animal (PES) en la capa 0-20 cm del suelo. Puntos rellenos indican valores de DA Pospastoreo, vacíos Prepastoreo.

No se observó una relación entre Δ DA y los valores de MO, ya sea analizando por tratamientos o grupos texturales. Estudios de incremento de la DA por tránsito vehicular en remolacha azucarera han sido relacionados con los contenidos de MO. Angerds y Simard, 1986 demostraron una relación negativa entre ambas variables, utilizando un gradiente texturales y de MO mucho más amplios (1%-6%), con cargas mayores al utilizado en el presente trabajo.

Se encontró un ajuste satisfactorio para los valores de ΔDA con los valores de Nan para el tratamiento PES ($R^2=0,66$) (Fig. 11). El Nan presenta una estrecha relación con la materia orgánica particulada (MOP), especialmente en la capa superficial del suelo (Fabrizzi et al., 2003; Studdert et al., 2006). A su vez, la MOP está estrechamente relacionada con la estabilidad de agregados del suelo (Eiza et al., 2006), por lo cual, es esperable que los mayores contenidos de Nan se relacionen con una mayor estabilidad estructural y una mayor tolerancia a la densificación del suelo por el pisoteo animal. El análisis de regresión no estableció relaciones con las parcelas TES y MOD, lo cual podría explicarse por un efecto (en promedio), menor, de estos tratamientos sobre la DA del suelo (Tabla 6).

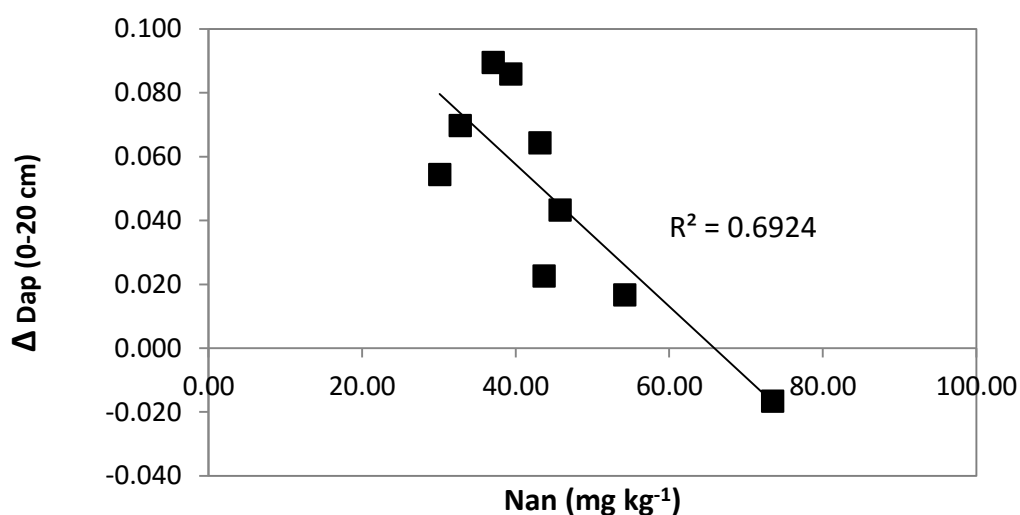


Figura 11 - Relación entre los valores de ΔDA y los valores de Nan (mg kg^{-1}) para las parcelas con la mayor carga animal (PES) en la capa 0-20 cm del suelo.

Varios autores observaron aumentos significativos de DA en las capas superficiales del suelo por pastoreo vacuno en pasturas (Chanasyk; Naeth, 1995; Greenwood et al., 1997; Greenwood; McKenzie, 2001). Si bien no se hallaron efectos significativos entre los tratamientos en las distintas profundidades, se puede observar una tendencia a diferenciarse los valores de DA superficiales, en los tratamientos TES y MOD del PES (Fig. 12). Por otro lado, Fernández et al. (2010) no observaron diferencias significativas en la DA por efectos del pastoreo animal en la capa 0-10 cm.

Pietola et al. (2005) observaron que el pisoteo en condiciones de suelo saturado produce efectos de amasado y homogenización del suelo, reduciendo la DA del suelo, condición que se presentó durante el primer pastoreo. Pudiendo haber generado un efecto amortiguador en los procesos de compactación.

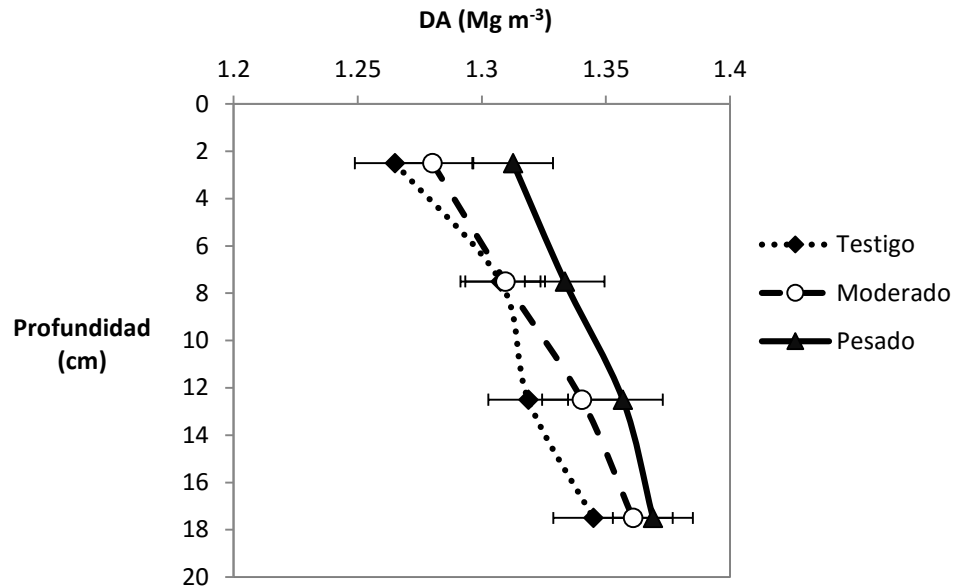


Figura 12 - Valores de DA posterior a los pastoreos para los distintos tratamientos evaluados en las capas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm. Barras indican error estándar.

4.4.2 - Resistencia mecánica.

Los valores de RM requieren similares contenidos de humedad para ser comparables (Collazo, 2004). Por lo cual, se evaluaron los contenidos hídricos previo al análisis de los datos, observándose que los contenidos hídricos en ambos momentos de muestreo no fueron similares en la capa 0-20 cm ($p=0,013$). Siendo en promedio un 24% mayor en el momento previo al primer pastoreo, por lo cual se analizan los datos posteriores a los pastoreos. Se detectó interacción entre Textura:Profundidad y Tratamiento:Profundidad sin encontrarse interacción Tratamiento:Textura. La Tabla 7 muestra los valores de RM en función de la textura, tratamiento y profundidad.

El tratamiento TES se diferenció de MOD y PES en las capas 0-5 cm; 5-10 cm sin diferencias en las restantes (Fig. 13). Entre texturas se observaron diferencias en la capa 0-5 cm y 5-10 cm entre FaA y FA con respecto a AF, sin diferenciarse en capas más profundas. FA mostró mayores valores que AF, con FaA en posición intermedia (Tabla 7). La interacción Textura:Profundidad mostro en las texturas FA y FaA, diferencias significativas en las capas 0-5 cm y 5-10 cm, de las restantes profundidades. Para AF, solo se diferenció la capa 10-15 cm.

Tabla 7. Valores medios de RM (MPa) para los distintos tratamientos y texturas. Letras mayúsculas indican diferencias entre profundidades (cm), letras minúsculas entre tratamientos o texturas, según corresponda.

Tratamiento	0-5		5-10		10-15		15-20	
Testigo	2,18	b	1,86	b	1,70	a	2,03	a
	A		BC		C		AB	
Moderado	2,88	a	2,53	a	1,67	a	1,92	a
	A		B		C		C	
Pesado	3,20	a	2,75	a	1,80	a	1,91	a
	A		B		C		C	
Textura	0-5		5-10		10-15		15-20	
AF	2,11	b	1,93	b	1,57	a	2,14	a
	A		A		B		A	
FA	3,37	a	2,91	a	1,98	a	1,91	a
	A		B		C		C	
FaA	2,77	a	2,31	ab	1,63	a	1,81	a
	A		B		C		C	

El efecto de los tratamientos fue mayor en profundidad que el observado por Agostini (2009), donde el aumento de la RM se limitó a la capa 0-5 cm, lo cual puede estar dado por una mayor carga animal utilizada en el presente ensayo. Lanzanova et al. (2007) indicaron un efecto de la RM hasta los 8 cm superficiales del suelo. Trein et al. (1991), utilizando cargas similares a la de este trabajo, indicaron que el pisoteo afecta la RM en la capa 0 cm – 7,5 cm.

Ambos tratamientos con presencia de animales tuvieron al momento del muestreo valores por encima del considerado como valor crítico de 2,5 MPa (Pabin et al., 1998; Hamza; Anderson, 2005). Lipiec y Hatano (2003) indican que valores por encima de 1,7 Mpa empiezan a restringir el crecimiento de las raíces, paralizándose en valores cercanos a 3 Mpa - 4 Mpa. Los menores valores de RM se observaron en la textura AF, lo cual puede derivarse de su menor compresibilidad, atribuido a su textura más gruesa (Smith et al., 1997)

La RM es un indicador sensible para detectar cambios en la compactación del suelo por pisoteo animal (Hamza; Anderson, 2005). Aun así, el efecto sobre los cultivos sucesores estará influenciado por los contenidos hídricos del suelo, debido a su relación inversa con la RM (Krüger et al., 2008). En este aspecto, al momento del muestreo, el suelo se encontraba con contenidos hídricos elevados. Es de esperarse que los valores de RM se diferencien en mayor medida en años con precipitaciones más cercanas a la media regional. Para las condiciones climáticas ocurridas en este

ensayo, se podría esperar una reducción de los valores de RM a la siembra, dado por un mayor contenido hídrico del suelo en la fecha de siembra.

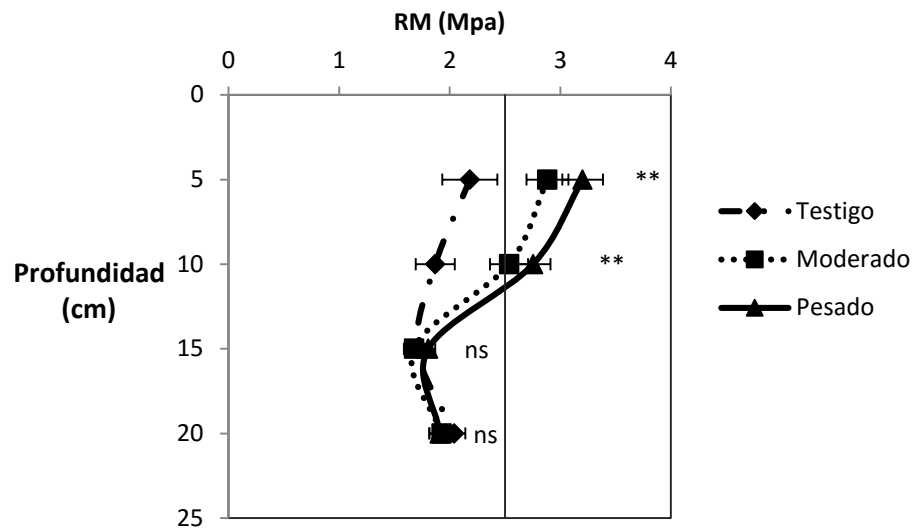


Figura 13 - Valores de RM para los distintos tratamientos de carga evaluados, asteriscos indican diferencias significativas de PES y MOD contra TES, línea sólida indica el límite crítico de resistencia a la penetración.

4.4.3 - Conductividad Hidráulica.

Debido su falta de normalidad los datos de conductividad hidráulica fueron transformados por el método de Box-Cox. El resultado de la transformación puede ser observado en la figura 14, formándose la variable K transformada (Kt).

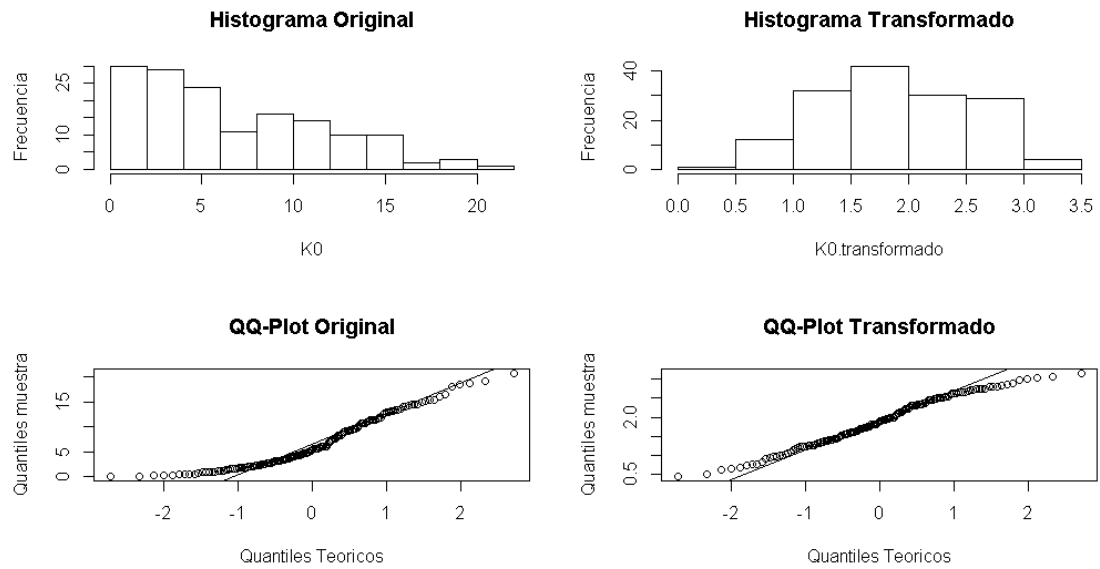


Figura 14 - Distribución original (izquierda) y transformada (derecha) por el método de Box-Cox para los datos de conductividad hidráulica saturada.

La Fig. 15 muestra los valores de conductividad hidráulica transformados (K_t) luego del pastoreo y su variación respecto del valor previo al pastoreo (ΔK_t). El análisis estadístico indica efectos significativos de los tratamientos luego de ocurridos los pastoreos. MOD y PES redujeron la conductividad hidráulica del suelo respecto de TES, sin diferencias entre ellos. Con respecto a su situación inicial los tratamientos con pisoteo mostraron una reducción porcentual del 18,6 y 20,8% respectivamente, con una mejora del 7,8% en los testigos.

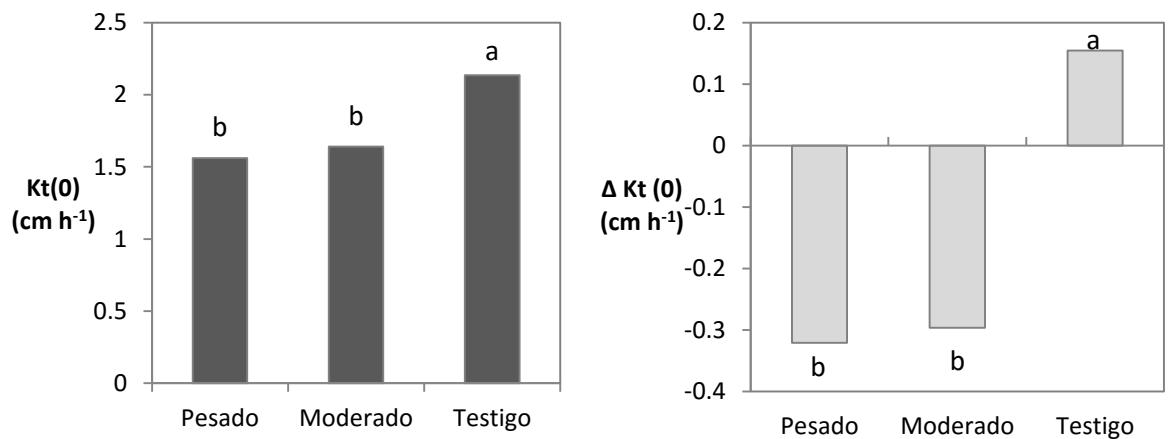


Figura 15 - Valores de conductividad hidráulica transformada posterior a los pastoreos ($K_t(0)$) y diferencia de conductividad hidráulica transformada entre fechas de muestreo ($\Delta K_t(0)$). Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos.

La Fig. 16 muestra los valores transformados de conductividad hidráulica (K_t) para las distintas tensiones. $K_t(1,5)$ tuvo el mismo comportamiento que la $K_t(0)$. $K_t(3)$ presentó un comportamiento diferencial, no observándose reducciones significativas de la conductividad hidráulica posterior a los pastoreos, como así, en relación a su situación inicial. Los mayores cambios ocurridos por el efecto del pastoreo ocurrieron a las menores tensiones de medición, lo cual, se correlaciona con poros de mayor diámetro. Los cambios observados en el movimiento de agua indican que los efectos son limitados a poros de diámetro mayor a $1000\ \mu\text{m}$. Luxmoore (1981) indica a los poros mayores a $1000\ \mu\text{m}$ como los macroporos hidráulicamente activos, los cuales si bien representan un pequeño porcentaje de la porosidad total, son los encargados mayoritariamente del movimiento de agua en el suelo.

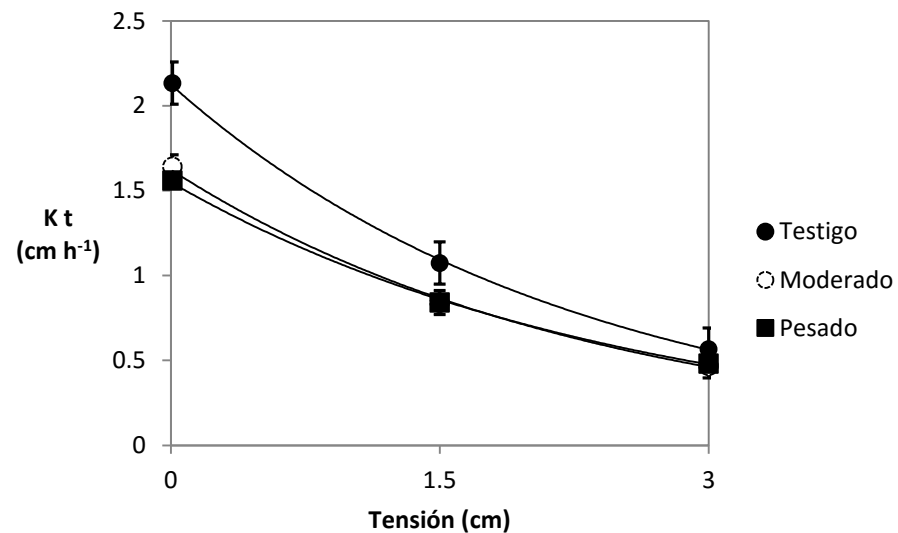


Figura 16 - Conductividad hidráulica transformada (K_t) para distintas tensiones en los tratamientos evaluados. Barras indican error estándar. Línea corresponde al ajuste exponencial de los datos.

Vahhabi et al. (2001); Mwendera y Saleem (1997) también detectaron una reducción en la $K(0)$ por causa del pisoteo animal. Imhoff et al. (2010), comparando sistemas de labranza, no observó diferencias en conductividad hidráulica en $K(3)$, pero sí en $K(0)$ y $K(1.5)$.

Las determinaciones de K presentaron una gran variación, lo cual tiene una intrínseca relación con la variabilidad espacial y temporal de la matriz del suelo (Nielsen et al., 1973) (Tabla 8). Altos valores de variabilidad en la conductividad hidráulica del suelo han sido reportado por otros investigadores (Papanicolaou et al., 2015; Gwenzi et al., 2011; Ronayne et al., 2012; West et al., 2008).

Tabla 8. Valores sin transformar de K (cm h^{-1}) para los distintos tratamientos a distintas tensiones. CV (coeficiente de variación).

Medias			
Tratamiento	K(0)	K(1,5)	K(3)
Testigo	8,58	4,25	2,19
Moderado	4,36	2,05	1,06
Pesado	3,85	1,94	1,06
CV			
Tratamiento	K(0)	K(1,5)	K(3)
Testigo	53,26	54,59	59,82
Moderado	82,57	67,80	66,04
Pesado	75,32	65,98	68,87

4.4.4 - Curva de retención de agua.

La curva de retención de agua presentó diferencias significativas entre tratamientos, como así también para las diferentes texturas; sin embargo, no se observó interacción de ningún tipo. En la Figura 17 se puede observar el agua retenida para cada tensión evaluada. Los tratamientos con pisoteo animal (MOD y PES) redujeron la capacidad de retención de agua respecto de TES en todas las tensiones, a excepción de la tensión a 56 cm.

Las diferentes texturas expresaron diferencias estadísticamente significativas en todas las tensiones evaluadas, observándose para la textura FaA mayores valores de retención de agua que FA y esta mayor que AF. Lo cual puede atribuirse a distintos potenciales mátricos presentes en cada textura (Koorevar et al., 1983).

El contenido de agua del suelo es uno de los factores más influenciados por la compactación (Soane; Ouwerkerk, 1994). Zhang et al. (2006) observaron diferencias en retención de agua hasta tensiones de 80 cm. Tarawally et al. (2004) reportaron que la compactación afectó el espacio poroso, principalmente en poros de diámetro mayor a $50 \mu\text{m}$ en un Oxisol. Beriso et al. (2012) hallaron efectos similares luego de 14 años de haber ocurrido tránsito pesado por el lote, existiendo efectos significativos por compactación en poros mayores a $30 \mu\text{m}$ de diámetro en las profundidades 30 cm; 50 cm; 70 cm y 90 cm.

El hecho de que no se observen diferencias a la mayor tensión (56 cm) podría estar dado por la presencia de poros de menor diámetro ($50 \mu\text{m}$), los cuales son menos susceptibles a la compactación. Oliveira (1968) indica una tensión de 60 cm como punto de quiebre entre macroporos y microporos.

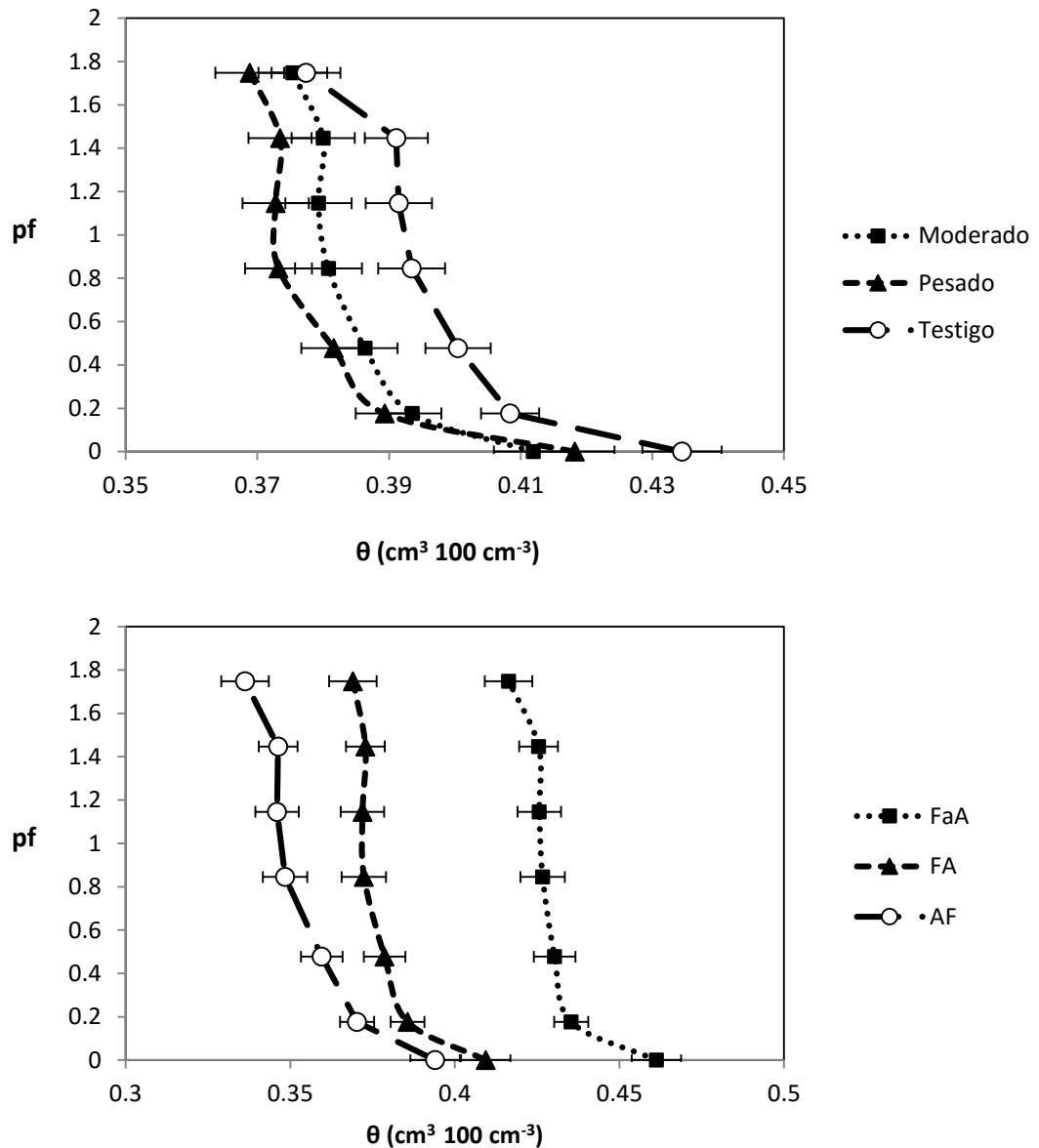


Figura 17 - Contenido volumétrico de agua a distintas tensiones de medición ($pF = \log(h)$). Superior: curvas para los distintos tratamientos de pastoreo evaluados, inferior: curvas para las diferentes texturas. Barras indican error estándar.

Las distintas texturas no evidenciaron diferencias significativas en la capacidad de retención en agua entre las distintas fechas de muestreo (ΔCRA). Esto se contradice con lo observado por otros autores, donde una mayor cantidad de material radical (como sería esperable luego del ciclo del verdeo), aumenta la capacidad de retención en agua. Las raíces afectan la succión del suelo, pudiendo generar cambios en la estructura del suelo a través de la retención de agua en raíces (Taleisnik et al., 1999), llenado de espacios porosos (Scholl et al., 2014) y liberación de exudados radicales (Traoré et al., 2000). La presencia de raíces se relaciona con un mayor valor de

entrada de aire, en relación a suelos sin vegetación, pudiendo inducir cambios positivos en la curva de retención de agua del suelo (Leing et al., 2015).

En la figura 18 se pueden observar los valores para Δ CRA. Se observa una tendencia del testigo en tener una menor pérdida de la CRA luego de los pastoreos, aunque no se dispone de evidencias suficientes para confirmar dicha tendencia.

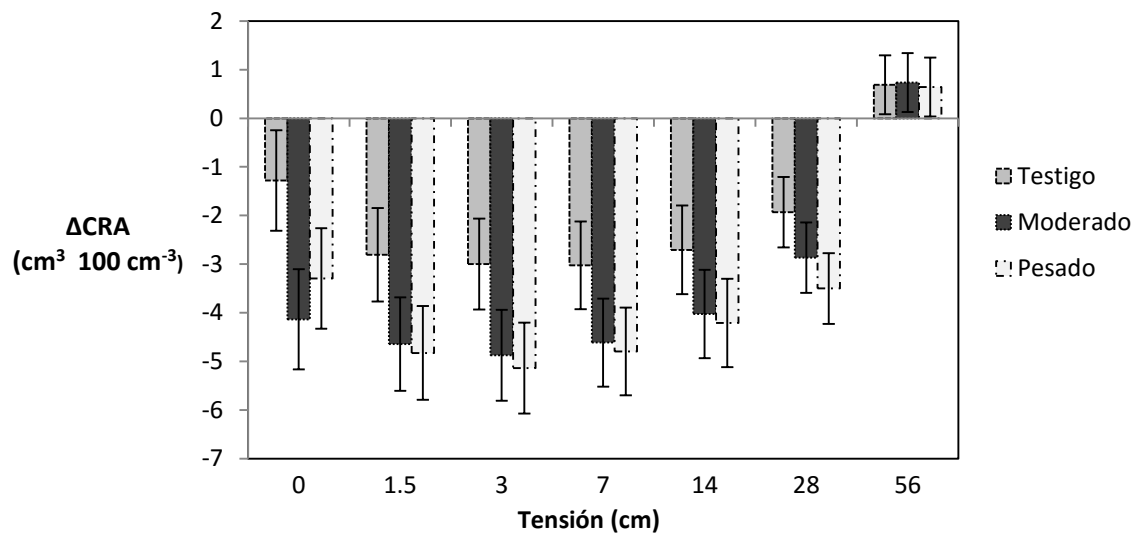


Figura 18 - Cambio en la cantidad de agua retenida a distintas tensiones de medición, pre y post pastoreos (Δ CRA), en la capa 0-5 cm. Barras indican error estándar.

4.4.5 - Macroporosidad.

La macroporosidad del suelo en la capa de 0 – 5 cm de profundidad, únicamente presentó diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos a la mayor tensión evaluada (56 cm) (Figura 19). Las discrepancias entre tensiones, en la cantidad de agua retenida y la macroporosidad hacen referencia a su forma de cálculo (8). La curva de retención de agua evalúa el volumen total de poros existentes por debajo de una tensión de medición, en cambio el porcentaje de macroporosidad observa el espacio poroso que se origina entre la porosidad total y la tensión de medición.

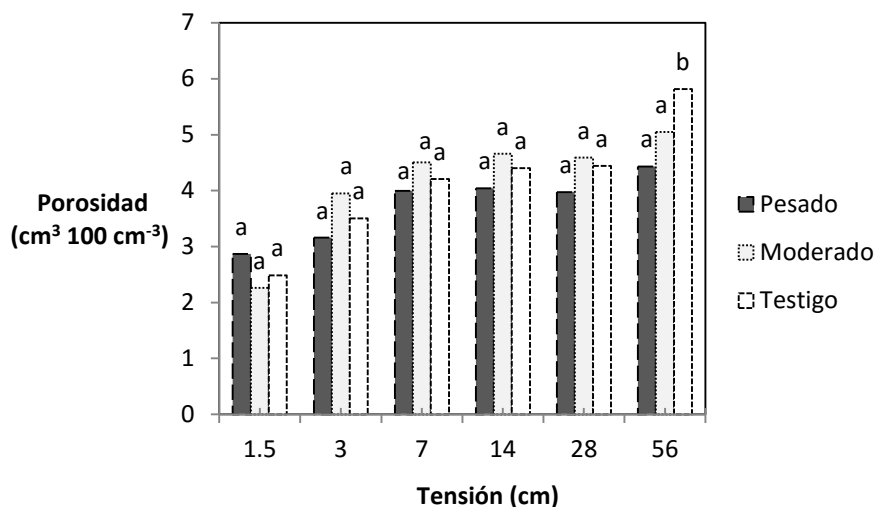


Figura 19 - Macroporosidad para distintas tensiones evaluadas en la capa 0-5 cm, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos.

El efecto en una tensión no es independiente de las restantes, arrastrando el efecto a lo largo de toda la curva. A partir de 56 cm de tensión ya no hay efecto en los cambios de retención de agua debido a que las diferencias se generaron en las tensiones menores. Esto lo confirma el porcentaje de macroporosidad, el cual en la tensión 56 cm detecta diferencias, debido a que se acumula el efecto de 1,5 cm, 3 cm, 7 cm, 14 cm y 28 cm. Por lo cual, se puede inferir que la tensión de 56 cm, correspondiente a poros de 50 μm de diámetro, forma un punto de quiebre entre el efecto del pisoteo sobre la porosidad, siendo muy cercano al límite de macroporos mencionado por Oliveira (1968).

No se encontraron evidencias significativas que separen la tensión de 1,5 cm, como sería esperable según lo observado a campo con los infiltrómetros de disco a tensión, esto puede ser atribuido al bajo porcentaje de dicha fracción en la porosidad total del suelo (2,2% - 2,8%), o por la presencia de raíces que bloquean los espacios porosos (Pietola et al., 2005). De igual forma que en ΔCRA , no se observaron cambios significativos en el tiempo.

4.5 - Cultivos de verano

4.5.1 - Nitrógeno disponible a la siembra.

No se encontraron diferencias en los niveles de nitratos, ya sea entre tratamientos o texturas a través de las 4 profundidades evaluadas, las únicas diferencias observadas fueron entre profundidades ($p < 0,01$). Se observó una baja ($R^2 = 0,21$), pero significativa ($p < 0,05$) relación lineal entre MO y ND a la siembra. De Neve y Hofman (2000) trabajando en un suelo con una textura similar a las estudiadas, no observaron

cambios en la mineralización de nitrógeno por efecto de la compactación, indicando efectos a partir de DA mayores a $1,6 \text{ Mg m}^{-3}$, la cual está por encima de las máximas DA observadas en el presente trabajo. Linden et al., (1989), generando distintos grados de densificación del suelo, no observo cambios en la mineralización de carbono en distintas densidades de suelos con textura similar a la estudiada en el presente trabajo. Pero si observo en cambios sobre texturas mas finas.

4.5.2 - Agua disponible a la siembra.

No se observaron efectos de los tratamientos sobre el contenido de agua previo a la siembra de cultivo de verano, los únicos efectos detectados son aquellos atribuidos a las distintas texturas evaluadas en este experimento (Fig. 20). Si bien se constató una reducción en los niveles de $K(0)$, las altas precipitaciones ocurridas previas al momento de siembra, anularon las potenciales diferencias entre tratamientos.

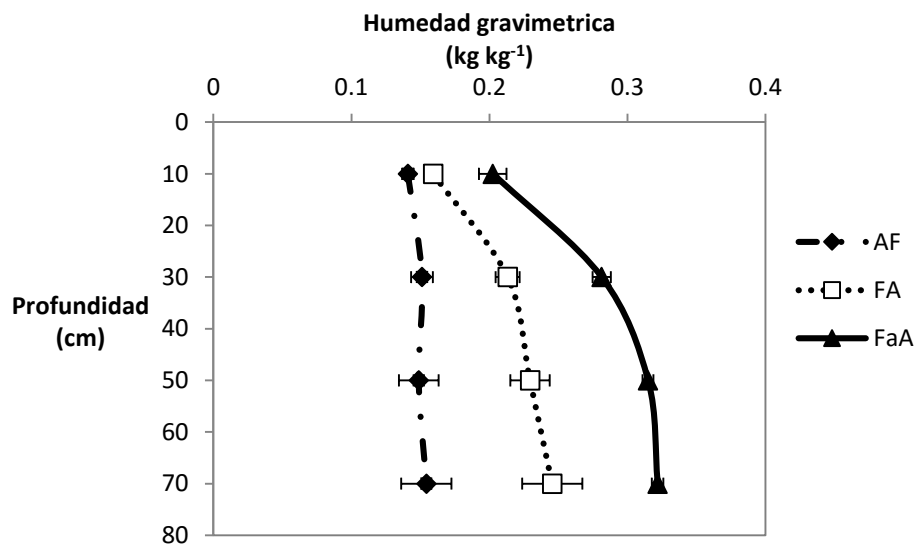


Figura 20 - Contenidos de agua gravimétricos en el momento de la siembra de verano para las distintas texturas evaluadas, en las capas 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm.

4.5.3 - Implantación de los cultivos sucesores.

No se observaron diferencias en la implantación de los cultivos, debido a diferencias texturales o por los distintos tratamientos de carga animal (Fig. 21). Si bien se detectó una interacción Tratamiento:Tiempo a partir de los 30 días de siembra en el cultivo de Soja, el mismo está vinculado a ataques de liebres (*Lepus europaeus*), que diezmaron la cantidad de plantas en el metro lineal.

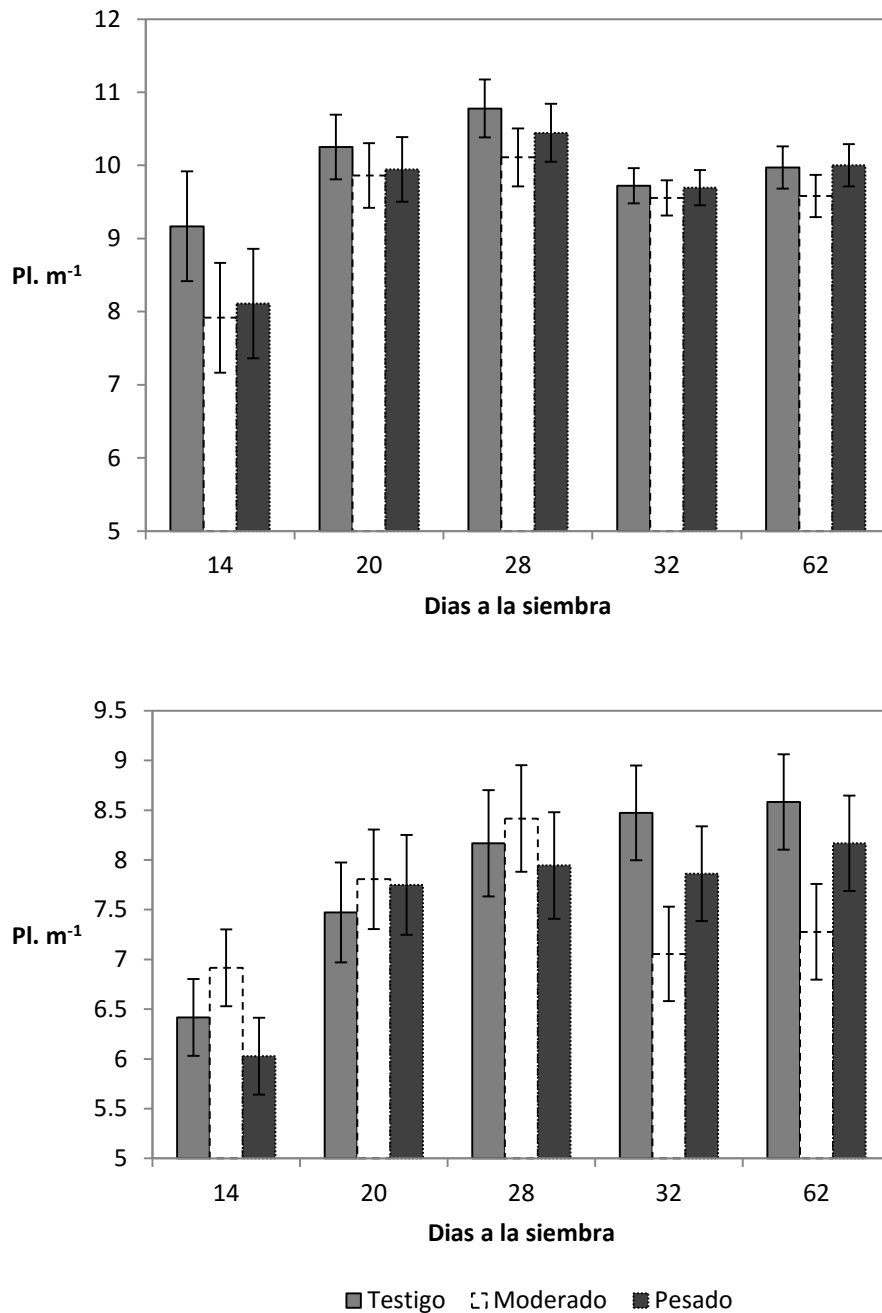


Figura 21 - Número de plantas emergidas por metro lineal, en función del tiempo en días desde la siembra del cultivo. Superior: Sorgo, Inferior: Soja.

A la siembra del cultivo, se observó la presencia de capas densificadas en superficie, aun así, la maquinaria permitió colocar las semillas a una profundidad adecuada y lograr buenas condiciones para su desarrollo. Otros autores atribuyen la falta de efectos a la remoción superficial realizada por la sembradora (Tourn et al., 2003; Botta et al., 2016). Las precipitaciones posteriores a la siembra permitieron una

fácil elongación de los órganos seminales en ambas especies, permitiendo una buena implantación.

La capacidad que poseen las raíces de penetrar suelos compactados está dada en gran parte por una capacidad genética, sin inferir el peso de la semilla en dicha capacidad. Ante la presencia de una alta impedancia mecánica en el suelo, las raíces aumentan su diámetro y reducen su tasa de elongación. El Sorgo y la Soja ante una alta RM del suelo sufren similares reducciones en la elongación de sus raíces seminales, aunque, las plantas de Soja pueden aumentar su diámetro hasta 80% contra 40% por parte del Sorgo (Materrechera et al., 1991). Un aumento del diámetro radical está relacionado con una mayor presión radial sobre las paredes del poro permitiendo un efecto de fractura hacia adelante del ápice radical (Barley, 1963). Por lo cual, el efecto negativo en el cultivo de soja estaría principalmente dado por la presencia de estructuras masivas que impidan una fácil elongación del hipocótilo con sus dicotiledónes sobre la superficie del suelo, efecto disminuido por el pasaje del tren de siembra y las buenas condiciones de humedad.

4.5.4 - Desarrollo de los cultivos sucesores

Los datos presentados son los referidos al cultivo de Sorgo, la Soja posterior a su implantación sufrió severos ataques selectivos de liebres (*Lepus europaeus*), disminuyendo la densidad del cultivo y determinando pérdida de parcelas, hecho que no permitió obtener datos confiables.

La Tabla 9 presenta los valores medios de altura de plantas, número de macollos, peso de materia seca, número de hojas por planta y porcentaje de proteína, determinados en el estadio V8 del cultivo de sorgo. No se observaron efectos producidos por los distintos tratamientos de carga animal.

Se observaron relaciones cuadráticas entre los contenidos hídricos a la siembra con MS ($R^2=0,628$) y altura de plantas ($R^2=0,876$) (Fig. 22 y 23, respectivamente). También se constató una relación cuadrática entre los niveles de Nan y la altura de las plantas de Sorgo ($R^2=0,54$) (Fig. 24). La textura AF se diferenció de las restantes en las variables altura y proteína, teniendo valores inferiores (Tabla 9). Para las distintas texturas, se observaron diferencias significativas en el contenido de Nan ($p=0,02$) (Fig. 25). AF presentó el menor valor de Nan, realizando un menor aporte de N por parte de la mineralización del suelo a la nutrición del sorgo.

Tabla 9. Medias y desvíos estándar para las variables analizadas en el cultivo de sorgo en el estadio de V8, letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos o texturas.

	Tratamiento		
	Testigo	Moderado	Pesado
Altura (cm)	89,02 ± 12,5 a	91,5 ± 14,07 a	89,58 ± 16,97 a
Nro. Macollos	1,34 ± 0,35 a	1,51 ± 0,47 a	1,31 ± 0,34 a
MS (g pl. ⁻¹)	19,93 ± 5,21 a	20,69 ± 6,82 a	20,57 ± 7,78 a
Nro. Hojas	10,16 ± 0,54 a	10,14 ± 0,50 a	10,26 ± 0,80 a
Proteína (%)	11,34 ± 3,56 a	10,49 ± 1,34 a	10,40 ± 3,09 a

	Textura		
	AF	FA	FaA
Altura (cm)	75,2 ± 14,05 b	94,9 ± 6,41 a	99,9 ± 4,97 a
Nro. Macollos	1,27 ± 0,46 a	1,37 ± 0,29 a	1,51 ± 0,40 a
MS (g pl. ⁻¹)	15,76 ± 8,26 a	22,36 ± 3,86 a	23,07 ± 3,87 a
Nro. Hojas	9,80 ± 0,82 a	10,44 ± 0,38 a	10,33 ± 0,35 a
Proteína (%)	9,05 ± 1,41 b	13,32 ± 3,30 a	11,47 ± 1,58 a

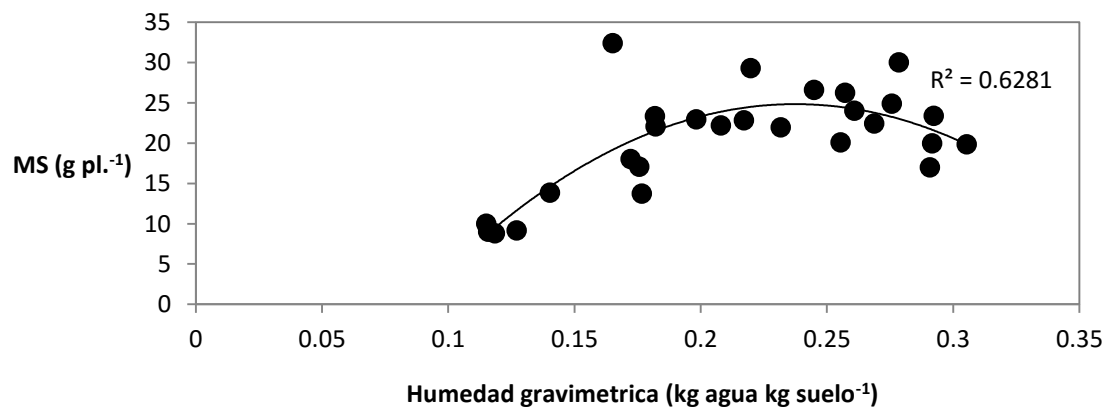


Figura 22 - MS media de sorgo (g pl.⁻¹) en estadio V8 en función del nivel de humedad gravimétrica en la capa 0-80 cm en la siembra del cultivo.

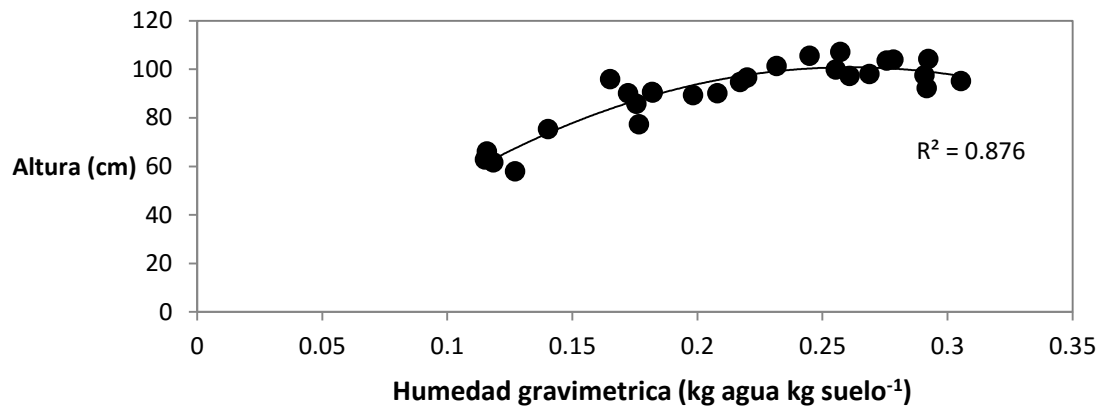


Figura 23 - Altura media de sorgo en estadio V8 en función del nivel de humedad gravimétrica en la capa 0-80 cm en la siembra del cultivo.

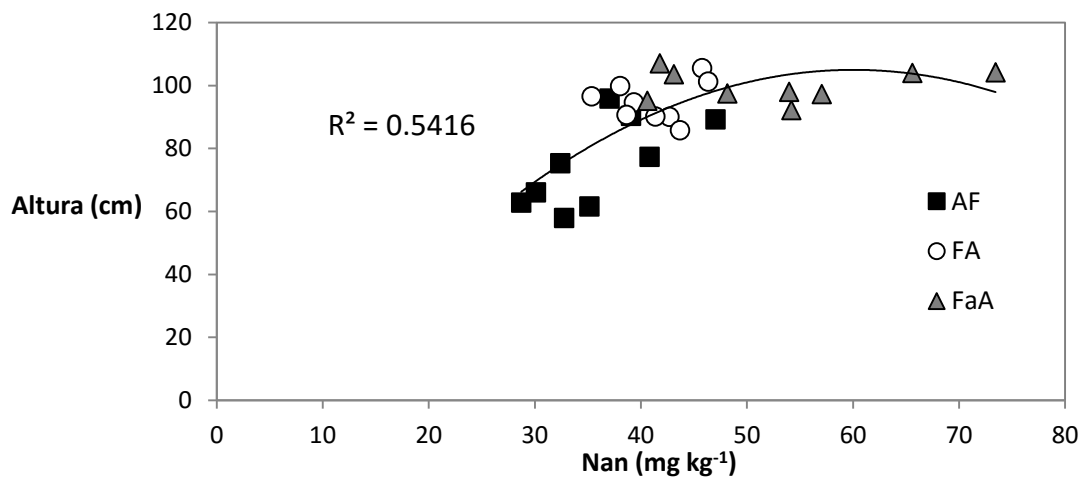


Figura 24 - Altura media de sorgo en estadio V8 función del nivel de Nan en la capa 0-20 cm.

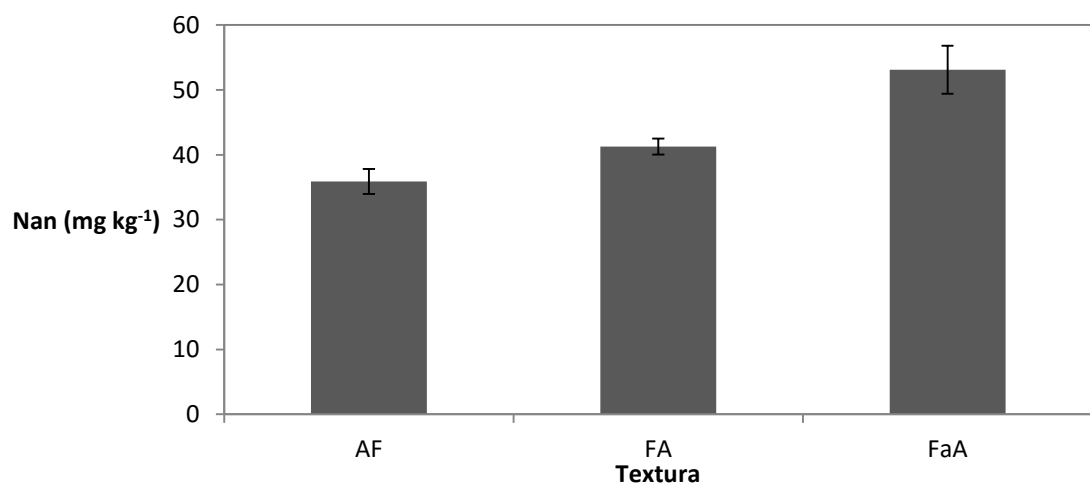


Figura 25 – Contenido de Nan para diferentes texturas en la capa 0-20 cm.

La Tabla 10 presenta los valores medios para las distintas variables determinadas a cosecha. La acumulación de biomasa a cosecha y rendimiento en grano no se vio afectada por los tratamientos, los efectos observados son atribuidos a los distintas texturas. Se observaron relaciones entre el peso de la materia seca acumulada y el contenido de MO del suelo en la capa 0-20 cm ($R^2=0,46$), Nan ($R^2=0,25$), Nitrógeno (0-60 cm) ($R^2=0,42$) y agua a la siembra ($R^2=0,54$). El mejor ajuste observado fue entre la materia seca sin espiga y contenido hídrico a la siembra ($R^2=0,65$).

El peso de espigas y rendimiento no fue afectado por los tratamientos de carga animal o las diferentes texturas. En este aspecto, el muestreo a cosecha de sorgo mostró fuertes ataques de “mosquita del sorgo” (*Cantarinia shorgicola*), el cual afectó la estimación de los rendimientos y el peso de espigas en varias parcelas.

Tabla 10. Valores medios (kg ha^{-1}) para distintas variables analizadas a cosecha de las plantas de sorgo. Letras distintas indican diferencias significativas entre texturas.

	AF	FA	FaA
Biomasa acumulada	11740 + 2443 a	15716 + 2718 b	17578 + 2099 c
Biomasa planta	5194 + 1833 a	7559+1830 b	8687+1196 c
Biomasa espiga	6546 + 1682 a	8157 + 2260 a	8890 + 1624 a
Rendimiento	3258 + 1347 a	3790 + 1426 a	4179 + 1072 a

4.6 - Relación entre variables estudiadas.

La sucesión de cultivos de verano sobre verdeos pastoreados puede generar problemas en la implantación y desarrollo de los cultivos sucesores (Moran et al, 2000). Los efectos en la RM se encontraron en la capa 0-10 cm, con valores que superan los límites de penetración radical. Aun así, las raíces poseen mecanismos para sortear altas impedancias mecánicas (Materechera et al., 1991).

Un aumento de la RM se relacionó con una degradación de los poros de mayor conducción del suelo, efecto que no es posible detectar con las determinaciones de DA, debido a que esta variable contabiliza el espacio poroso total del suelo, impidiendo separar la proporción de cada rango de tamaño de poros. Se observó una relación lineal negativa entre la RM a las profundidades de 0-5 cm ($R^2=0,35$) y 5-10 cm ($R^2=0,32$) con los valores de $K(0)$ (Fig. 26). Dicha relación se mantuvo para las restantes conductividades hidráulicas estudiadas.

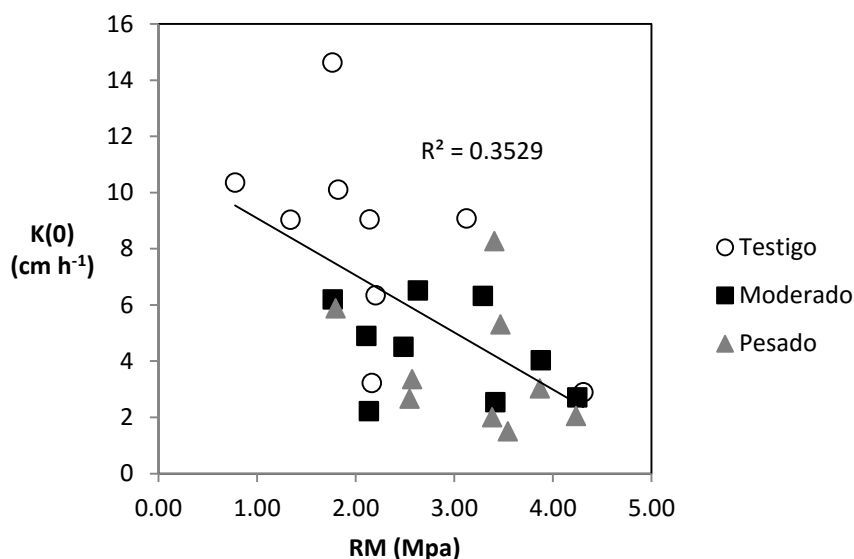


Figura 26 - Relación entre los valores medios de resistencia mecánica (0-5 cm) y los valores medios de conductividad hidráulica (cm h^{-1}) sin transformar.

Se observó una relación entre el volumen de poros mayores a $50 \mu\text{m}$ y los valores de $K(0)$. El valor del coeficiente de correlación fue $R^2=0.32$ (Figura 27), si se desglosa la correlación por texturas se observa para: FaA ($R^2=0.76$), FA ($R^2=0,6$) y AF ($R^2=0.033$), estando, esta última textura, influenciada por dos valores extremos, los cuales afectan en gran medida el coeficiente de correlación. No se observó una relación entre las mediciones de macroporosidad a 3 cm de tensión y $K(0)$, tensión a partir del cual no se diferenciaba los valores de conductividad hidráulica. Posiblemente por ser una pequeña proporción de los macroporos presentes en el suelo, siendo difícil contabilizarlos con precisión a través de los métodos propuestos. El valor umbral de $50 \mu\text{m}$, al integrar el volumen de todo el espacio poroso por encima del mismo, permite observar las tendencias.

En concordancia con los datos obtenidos en este trabajo, Zhao et al. (2010) indicaron que la reducción de la porosidad ($>50 \mu\text{m}$) debido al pisoteo animal, se vio reflejado en un descenso de la conductividad hidráulica saturada.

Se pudo observar una correlación lineal negativa ($R^2=0,42$) entre la RM en la capa (0-5 cm) y los valores de macroporosidad ($>50 \mu\text{m}$). Relación similar se observó previa al pastoreo, aunque en este caso el modelo de mayor ajuste fue del tipo logarítmico, no ajustándose al modelo la textura FaA. La Figura 28 muestra la relación para ambos momentos de muestreo, dicha función se vuelve asíntotica cercano al valor crítico de RM (2,5 Mpa) observado en la bibliografía (Pabin et al., 1998; Hamza; Anderson, 2005), apoyando su uso como valor umbral. Dicha relación es importante poder

validarla con nuevos set de datos, dado la simplicidad de la estimación de la RM y la importancia de la macroporosidad en las propiedades físicas del suelo.

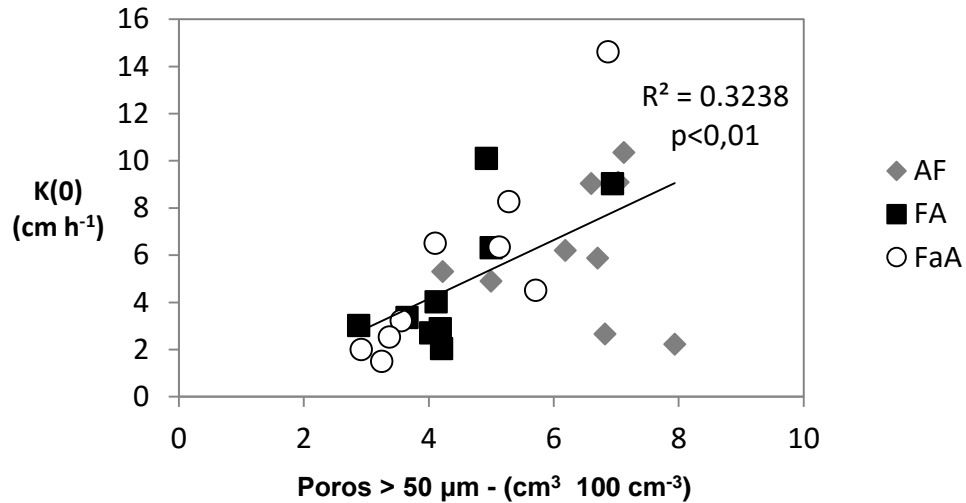


Figura 27 - Relación entre los valores de $K(0)$ y macroporosidad (poros $> 50 \mu\text{m}$ de diámetro) en las texturas evaluadas.

Se pudo constatar que el pisoteo animal genera cambios en el espacio poroso del suelo, afectando poros de hasta $50 \mu\text{m}$ de diámetro. Del cambio total en la porosidad, solo afectaron significativamente la conductividad hidráulica del suelo aquellos poros de diámetro mayor a $1000 \mu\text{m}$. La porosidad por debajo de dicha tensión (-3 cm) parece desarrollar un papel menor en el movimiento de agua, siendo porcentualmente un 25% a 27% de la $K(0)$ (Tabla 5), por lo cual una reducción de su porosidad no influyó directamente en una menor conductividad hidráulica.

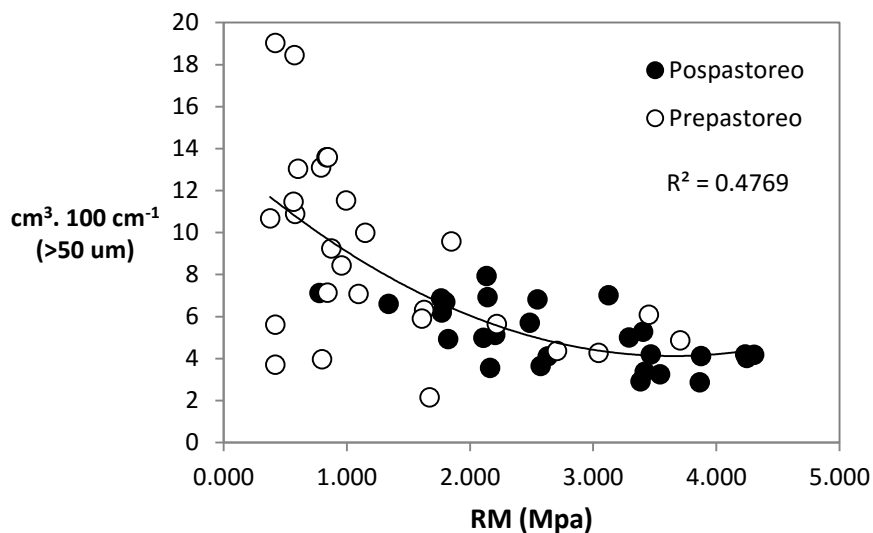


Figura 28 - Relación entre los valores de RM (MPa) y macroporosidad previas y posterior al pastoreo. Línea indica ajuste de regresión polinómica de segundo grado.

Si bien, existió un efecto negativo en las propiedades físicas del suelo, dichos efectos no repercutieron en la implantación y desarrollo de los cultivos de verano. Al momento de la siembra se pudo constatar (visualmente) la presencia de pequeños restos de capas endurecidas sobre el surco luego del pasaje del tren de siembra. Las buenas precipitaciones durante el ciclo disminuyeron la RM y permitieron que dicho impedimento no afecte la implantación. Es de notar, que pueden esperarse resultados diferentes en un año cercano a las precipitaciones normales para el sitio de estudio, momento en el que la RM se incrementa por menor contenido de agua del suelo. Situaciones similares, dadas por la variabilidad climática, fueron observadas por Venanzi et al. (2004) y Moran et al. (2000).

No se observó interacción en la mayoría de las variables de suelo analizadas, dentro de este rango textural no existió un comportamiento diferencial por el pisoteo animal. Los tratamientos de carga animal (PES y MOD) presentaron pocas variaciones en las variables analizadas, lo cual indicaría que las cargas estudiadas en el presente trabajo son altas, llegando a un estado estable de compactación con 200 animales. Ha^{-1} . Los resultados obtenidos sustentan la hipótesis que los distintos efectos negativos producidos por el pastoreo animal (aumento de RM, DA, reducción de $K(0)$ y porosidad) no afectan la implantación ni la producción de los cultivos en un año con buenas precipitaciones.

Los efectos negativos de la compactación sobre el crecimiento de los cultivos se relacionan con otros factores ambientales, de modo que la predicción de la respuesta de la planta en términos de producción de biomasa o rendimiento en grano es extremadamente dificultosa. Al presente, ha sido más fácil mostrar relaciones directas causa-efecto entre capas compactadas y crecimiento de raíces, que mostrar la existencia de tales relaciones con el rendimiento. Según Bowen (1981) si el crecimiento radical limitado por la compactación no induce estrés por falta de agua, nutrientes o anclaje en algún momento entre la emergencia y la madurez fisiológica, la compactación no disminuirá el rendimiento. A su vez, los elementos de medición utilizados, integran sus determinaciones un volumen de suelo substancialmente mayor que el tamaño de la raíz. Raíces pequeñas y flexibles pueden penetrar capas de suelo a través de grietas, túneles de lombrices, viejos canales de raíces y otros huecos que no afectan significativamente los resultados de tales mediciones.

La investigación realizada, presenta resultados que se corresponden con otros a nivel mundial, en las cuales, el pastoreo genera un impacto negativo en las propiedades físicas del suelo con un bajo efecto en el rendimiento de los cultivos

siguientes. Existe una serie de razones por las cuales el efecto del pastoreo es bajo. La caída en la conductividad hidráulica no necesariamente se refleja en una reducción de la infiltración a campo, una gran proporción de las precipitaciones son de baja intensidad permitiendo la infiltración del agua dentro del suelo. Por otro lado, la remoción de la cobertura por el pastoreo genera efectos confundidos al aumentar las tasas de transpiración del suelo y reducir la eficiencia de captación de agua de lluvia. Debido a que el aumento de la RM y DA no suele superar los primeros 10 cm del suelo el periodo en el que se ven afectadas el crecimiento de las raíces es corto siendo los aumentos en la RM no estables en el tiempo presentando una gran dependencia del patrón de disponibilidad de agua (Bell et al., 2011). A su vez, existen mecanismos de recuperación natural dados por procesos abióticos como los ciclos de humectación-deseccación (asociado al contenido y tipo de arcillas) y bióticos originados por crecimiento radical y macrofauna del suelo (Oades, 1993; Taboada et al., 2004). Zonas de bajas precipitaciones, bajo crecimiento radical y baja actividad biológica son mas susceptibles al pisoteo debido una menor expresión de estos mecanismos.

Al presente, la búsqueda de indicadores relacionados con perdidas de rendimiento ah sido dificultosa por lo anteriormente expuesto. Lebert et al. (2006), en una revisión de trabajos de compactación en Alemania, expresa que la las propiedades físicas del suelo se ven afectadas cuando el volumen de macroporos es menor al 5%, la conductividad hidráulica es menor a 10 cm dia^{-1} o la DA supera los $1,8 - 2,0 \text{ Mg m}^{-3}$. En este trabajo se observaron valores cercanos e inferiores a 5% de porosidad con conductividades hidráulicas superiores y DA menores, no habiendo efectos negativos sobre el cultivo.

Es necesaria la evaluación de los tratamientos en años con condiciones cercanas o menores a la media de precipitación regional, para confirmar el comportamiento de la carga animal sobre las texturas analizadas. Se debe identificar y caracterizar los mecanismos de recuperación natural del suelo, estableciendo su importancia en los procesos de descompactacion. También es necesario desarrollar técnicas que permitan analizar la variabilidad espacial del pisoteo animal, permitiendo dirigir esfuerzos en el diagnostico y recuperacion de las propiedades físicas del suelo.

5 - CONCLUSIONES.

El pastoreo invernal no produjo afectos negativos en la implantación de los cultivos de verano y producción del cultivo de sorgo, si bien se constataron efectos negativos en los parámetros físicos del suelo, estos no repercutieron en los cultivos. Es de esperar que los presenten resultados no se expresen de igual manera en años con precipitaciones más cercanas a las normales para la zona.

- Los mayores contenidos de arcilla+limo analizados no produjeron un mayor impacto negativo en las propiedades físicas del suelo.
- No se observó una interacción entre los grupos texturales, carga animal y el grado de afectación de la CRA, MACRO, RM y K(h). Solo se observó interacción en la DA. Para esta variable, el tratamiento de mayor carga incremento los valores solamente en la textura AF.
- Bajo las condiciones ocurridas en el ensayo, no se observó una mejor implantación del cultivo de Sorgo sobre la Soja.

De los indicadores utilizados en este trabajo, la RM se destacó por su grado de sensibilidad y correlación con distintas propiedades físicas del suelo. Siendo apropiado para determinaciones a campo del estado de compactación del suelo por el pisoteo animal.

Las condiciones climatológicas, los mecanismos de recuperación natural del suelo y los mecanismos adaptativos de las plantas pueden ser de gran importancia en la capacidad de sobrellevar los efectos negativos del pisoteo, dificultando establecer valores críticos de pérdidas de rendimiento a través de los indicadores utilizados.

6 - BIBLIOGRAFÍA.

- AAPRESID. Asociación Argentina de productores en Siembra Directa. [en línea] <<http://www.aapresid.org.ar/>> [consulta: 03 noviembre 2014]
- AGOSTINI, M.A. 2009. Compactación por pisoteo animal en planteos de producción mixta bajo siembra directa. Tesis de *Magister Scientiae*, Facultad de ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Mar del Plata. Balcarce. Argentina. 57 p.
- ALAOUI, A.; LIPIEC, J.; GERKE, H.H. 2011. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. *Soil and Tillage Research*. 115(116):1-15.
- ÁLVAREZ, R.; STEINBACH, H.S. 2009. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. *Soil and Tillage Research*. 104(1):1–15.
- ÁLVAREZ, C. R. 2013. Condición física de los suelos limosos bajo siembra directa Caracterización, génesis y manejo. International Plant Nutrition Institute. [en línea] <[http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/461A01A45E6B6A0852257B83005CEEC1/\\$FILE/2.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/461A01A45E6B6A0852257B83005CEEC1/$FILE/2.pdf)> [consulta: 06 abril 2014]
- AMIOTTI, N. 1996. Cambios en las propiedades de horizontes subsuperficiales inducidos por el laboreo del suelo: consecuencias agronómicas, aspectos genéticos y cartográficos taxonómicos. Tesis Doctoral. Depto. de Graduados. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca, Argentina. 314 p.
- ANGERS, D.A.; SIMARD, R.R. 1986. Relations entre la teneur en mati~re organique et la masse volumique apparente du sol. *Canadian Journal Soil of Science*. 66: 743-746.
- APARICIO, C.; COSTA, J.L. 2000. Efecto de labranzas en las propiedades hidráulicas de suelos del sudeste bonaerense usando infiltró metros de tensión. Actas 17° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 11-14 abril. Mar del Plata, Argentina.
- ARVITSON, J. 1998. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in yield and laboratory compression experiments. *Soil and Tillage Research*. 49(1):159-170.
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; HUNTER, E.A. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil and Tillage Research*. 57(1):83–91.
- BARLEY, K.P. 1963. Influence of soil strength on growth of roots. *Soil Science*. 96 (3), 175-180.
- BELL, L.W; KIRKEGAARD, J. A; SWAN, A.; HUNT, J.R; HUTH, N.I; FETTELL, N. A. 2011. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. *Soil and Tillage Research*. 113:19–29.

- BERGH, R. F.; GARCÍA, J.; FERRARI, J.; RIZZALLI, R. 1996. Dinámica del nitrógeno, crecimiento y rendimiento de trigo bajo siembra directa y labranza convencional. En: AACR (ed.). Actas XV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. pp. 41-42. Santa Rosa, La Pampa.
- BERISSO, A.; SCHJØNNING, A. P.; KELLER, T; LAMANDE, A.; ETANA, A.; LE JONGE L.W; IVERSEN, B.V; ARVIDSSON, J.; FORKMAN J. 2012. Persistent effects of subsoil compaction on pore size distribution and gas transport in a loamy soil. *Soil and Tillage Research*. 122:42–51.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. 1986. Bulk density. En: A. Klute (ed.), *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*, 2nd Edition American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp. 363-375.
- BOTTA, G.F.; TOLÓN-BECERRA, A.; RIVERO, D.; LAUREDA, D.; RAMÍREZ-ROMAN, M.; LASTRA-BRAVO, X.; AGNES, D.; FLORES-PARRA, I.M; PELIZZARI, F.; MARTIRENA V. 2016. Compactación produced by combine harvest traffic: Effect on soil and soybean (*Glycine max* L.) yields under direct sowing in Argentinean Pampas. *European Journal of Agronomy*. 74: 155–163.
- BOWEN, H.D. 1981. Alleviating mechanical impedance. En: C.E. Arkin and H.M. Taylor (eds.). *Modifying the root environment to reduce crop stress*. St. Joseph : American Society of Agricultural Engineers. pp. 21-57.
- BRADFORD, J. M. 1986. Penetrability. En: A. Klute (ed.) *Methods of soil analysis, Part 1. Physical and mineralogical methods*, 2nd Edition. American Society of Agronomy. Madison, Wisconsin, USA. pp. 463-478.
- BRAY, R.H.; KURTZ, L.T. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science*. 59(1):39-46.
- BREMNER, J.; KEENEY, D. 1966. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soil: exchangeable ammonium, nitrate and nitrite by extraction–distillation methods. *Soil Science Society of America, Proceedings*. 30:577–582.
- BRYANT, F.T.; BLASER, R.E.; PETERSON, J.R. 1972. Effect of trampling by cattle on bluegrass yield and soil compaction of a Meadowville Loam. *Agronomy Journal*. 64(3): 331-334.
- CARROL, Z.L.; OLIVER, M.A. 2005. Exploring the spatial relations between soil physical properties and apparent electrical conductivity. *Geoderma*. 128(3):354-374.
- CERANA, J.; POZZOLO, O; BENAVIDEZ, R.; RIVAROLA, S; WILSON, M.; DE BATTISTA J.J. 2004. La determinación de la resistencia mecánica a la penetración, para la Evaluación de la Sustentabilidad de los sistemas productivos. En: Filgueira, R; Micucci F. (eds.). *Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría*. Universidad Nacional de la Plata. La Plata, Argentina. pp. 55-73.

- CERISOLA, C.I. 2004. Uso del Penetrómetro en un modelo lineal para estimar la Densidad aparente seca de un suelo. Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. En: Filgueira, R; Micucci F. (eds.). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. Universidad Nacional de la Plata. La Plata, Argentina. pp. 75-82.
- CERVINI, M.L.; DEMARCO, D.G. 2003. Evaluación de la estabilidad productiva de sistemas agropecuarios. Archivos de zootecnia. 52:397-400.
- CHANASYK, D.; NAETH, A. 1995. Grazing impacts on bulk density and soil strength in the foothills fescue grasslands of Alberta, Canada. Canadian Journal of Soil Science. 75(4):551-557.
- CLARK J.T.; RUSSELL, J.R.; KARLEN, D.L; SINGLETON, P.L.; BUSBY W.D.; PETERSON, B.C. 2004. Soil surface property and soybean yield response to corn stover grazing. Agronomy Journal. 96(5):1364-1371.
- COCHRANE, H.R.; AYLMOORE, L.A. 1994. The effects of plant roots on soil structure. En: Proceedings of 3rd Triennial Conference Soils. Busselton, Australia.94: 207-212.
- COLLAZO, D.J. 2004. La resistencia a la Penetración como Parámetro Mecánico del Suelo. En: Filgueira, R; Micucci F. (eds.). Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría. Universidad Nacional de la Plata. La Plata, Argentina. pp. 43-53.
- COLOMBANI, E.N.; COSTA, J.L.; STUDDERT, G.A.; SUERO E. 2002. Evaluación de propiedades físicas de suelos del sudeste bonaerense bajo distintos manejos. 17° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-19 abril. Puerto Madryn, Argentina.
- COMA, C. 2012. Los territorios de la EEA INTA Bordenave, Visión sistémica y comparada. Sistema de Soporte de Decisiones (SSD). Artículos de divulgación online INTA Bordenave. Bahía Blanca, 3 de septiembre, 2012.
- DADDOW, R.L. y WARRINGTON, G.E. 1983. Growth limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. WSDG Report, WSDG-TN00005.
- DE NEVE, S.; HOFMAN, G. 2000. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. Biology and Fertility of Soils. 30(5-6):544-549.
- DEXTER, A.R.; KROSBERGEN, B.; KUIPERS, H. 1984. Some mechanical properties of aggregates of topsoil from the IJsselmeer polders. I. Undisturbed soil aggregates. Netherlands Journal of Agricultural Science. 32(3):205-214.
- DEXTER, A. R. 1991. Amelioration of soil by natural processes. Soil and Tillage Research. 20(1):87-100.
- DIAZ-ZORITA, M.; GROSSO, G. A. 2000. Effect of soil texture, organic carbon and water retention on the compactability of soils from the Argentinean pampas. Soil and Tillage Research. 54(1):121-126.

- DÍAZ-ZORITA, M.; DUARTE, A. G.; GROVE, J. H. 2001. A review of no-till systems and soil management for sustainable crop production in the subhumid and semiarid Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 65(1):1-18.
- DIGGLE, P.J.; RIBEIRO P.J. 2007. *Model Based Geostatistics*. Springer Science & Business Media. New York, USA. 227 p.
- DOMSCH, H.; GIEBEL, A. 2004. Estimation of soil textural features from soil electrical conductivity recorded using the EM-38. *Precision Agriculture*. 5(4):389-409.
- DONKOR, N.T.; GEDIR, J.V.; HUDSON, R.J.; BORK, E.W.; CHANASYK, D.S.; NAETH, M.A.; 2002. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Canadian Journal of Soil Science*. 82(1):1-8.
- DOOLITTLE, J.; BREVIK, E. 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soil studies. *Geoderma*. 223:33-45.
- EIZA, M. J.; STUDDERT, G. A.; FIORITI, N.; FRANCO DOMINGUEZ, G. 2006. Estabilidad de agregados y materia orgánica total y particulada en molisoles de Balcarce. 20° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta-Jujuy.
- EKWUE, E.J. 1990. Organic matter effect on soil strength properties. *Soil and Tillage Research*. 16(3):289-297.
- ELISSONDO, E.; COSTA, J.L; SUERO E.; FABRIZZI, K. P.; GARCIA, F. 2000. Evaluación de algunas propiedades físicas de suelos en sistemas de labranza reducida y siembra directa. Actas XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 11-14 abril. Mar del Plata, Argentina.
- ESPOSITO, G.P.; GESUMARIA, J.; BRICCHI, E.; CASTILLO, C.; BALBOA R. 2002. Modificaciones del espacio poroso de suelo por las labranzas y el pastoreo de los rastrojos. XVIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-19 abril. Puerto Madryn, Argentina.
- FABRIZZI, K.P.; MORÓN, A.; GARCÍA, F.O. 2003. Soil carbon and nitrogen organic fractions in degraded vs. non-degraded Mollisols in Argentina. *Soil Science Society America Journal*. 67(6): 1831-1841.
- FERNÁNDEZ, G.; ZUCCARI, A. 2007. Efecto de la diversificación sobre la estabilidad productiva física y económica de establecimientos agropecuarios de la región semiárida pampeana (Argentina). Actas 20° Reunión de ALPA – 30° Reunión de la Asociación Peruana de Producción Animal (APPA). Cusco, Perú.
- FERNÁNDEZ, P. L.; ALVAREZ, C.R.; SCHINDLER, V.; TABOADA, M. 2010. Changes in topsoil bulk density after grazing crop residues under no-till farming. *Geoderma*. 159(1), 24-30.
- FERRERO, A.; LIPIEC, J. 2000. Determining the effect of trampling on soils in hillslope woodlands. *International Agrophysics*. 14(1):9-16.

- FERRERAS, L. A.; COSTAB, J.L; GARCIAB, F. O.; PECORARIC, C. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern "Pampa" of Argentina. *Soil and Tillage Research*. 54(1):31-39.
- FRANZLUEBBERS, A.J.; STUEDEMANN, J.A. 2008. Soil physical responses to cattle grazing cover crops under conventional and no tillage in the Southern Piedmont USA. *Soil and Tillage Research*. 100(1):141-153.
- GARCÍA PRÉCHAC, F. 1998. Fundamentos de la siembra directa y su utilización en Uruguay, 2do. Seminario Internacional de Actualización Técnica. Facultad de Agronomía (UEPP-INIA). [en línea] <<http://www.rau.edu.uy/agro/uepp/siembra5.htm>> [consulta: 2 de febrero, 2014].
- GARDNER, W. R. 1958. Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soils Science*. 85(4).
- GEBHARDT, S.; FLEIGE, H.; HORN, R. 2009. Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in North Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*. 172(5):688-695.
- GIANELLO, C.; BREMNER, J.M. 1986. A simple chemical method of assessing potentially available organic nitrogen in soil. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*. 17(2):195-214.
- GIBBS, R.J; REID, J.B. 1988. A conceptual model of changes in soil structure under different cropping system. *Advances in Soil Science*. 8:123-149
- GIFFORD, G.F.; DADKHAH, M. 1980. Trampling effects on rangeland. *Utah Science*. 41(3):71-73.
- GIMÉNEZ L. I. 2009. Predicción temporal y espacial de las precipitaciones mensuales en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de la Coruña. España. 225 p.
- GOMEZ, L. A.; NAKAMA, V.; PURICCELLI, C. A. 1981. Carta Detallada de Suelos de la Estación Experimental Bordenave. EEA INTA Bordenave.
- GOSS, M.J. 1977. Effects of mechanical impedance on root growth in barley (*Hordeum vulgare L.*). III. Effects on the elongation and branching of seminal root axes. *Journal of Experimental Botany*. 28(1):96-111.
- GREENE, R; KINNELL, P; WOOD, J. 1994. Role of plant cover and stock trampling on runoff and soil erosion from semiarid wooded rangelands. *Soil Research*. 32(5):953-973.
- GREEN, T.; AHUJA, L.; BENJAMIN, J. 2003. Advances and challenges in predicting agricultural management effects on soil hydraulic properties. *Geoderma*. 116(1):3-27.
- GREENWOOD, K.L.; MACLEOD, D.A.; SCOTT, J.M.; HUTCHINSON, K.J. 1997. Long-term stocking rate effects on soil physical properties. *Animal Production Science*. 37(4):413-419.

- GREENWOOD, K.L.; MCKENZIE, B.M. 2001. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *Animal Production Science*. 41(8):1231-1250.
- GWENZI, W.; HINZ, C.; HOLMES, K.; PHILLIPS, I.R.; MULLINS, I.J. 2011. Field scale spatial variability of saturated hydraulic conductivity on a recently constructed artificial ecosystem. *Geoderma*. 166(1), 43-56.
- HÅKANSSON, I.; LIPIEC J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil and Tillage Research*. 53(2):71-85.
- HAMZA M. A.; ANDERSON W. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and tillage research*. 82(2):121-145.
- HELMKE, P. A.; SPARKS, D. L. 1996. Lithium, Sodium, Potassium, Rubidium, and Cesium. Sparks, D.L.; Page, A.L.; Helmke, P.A.; Loeppert, R.H (eds.).En: *Methods of Soil Analysis Part 3—Chemical Methods*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy. pp. 551-574.
- HOLT, J.A.; BRISTOW, K.L.; MCIVOR, J.G. 1996. The effects of grazing pressure on soil animals and hydraulic properties of two soils in semi-arid tropical Queensland. *Soil Research*. 34(1):69-79.
- HORN, R.; WAY, T.; ROSTEK, J. 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research*. 73(1):101-106.
- IGLESIAS, J.O.; GALANTINI, J.A.; KRÜGER, H. R.; VENANZI, S. 2010. Soil pore distribution as affected by cattle trampling under no-till and reduced-till systems. *Agriscientia*. 31(2): 93-102.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. 2000. Applications of the resistance curve in the control of the physical quality of soils under grass. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 35(7):1493-1500
- IMHOFF, S.; GIBERTO, P.J.; GRIONI, A.; GAY, J.P. 2010. Porosity characterization of Argiudolls under different management systems in the Argentine Flat Pampa. *Geoderma*. 158(3):268-274.
- Indicadores Ganaderos Junio 2013. 2013. Ministerio Nacional de Agricultura y Ganadería. [en línea] <<http://64.76.123.202/site/ganaderia/bovinos/02-Infomaci%C3%B3n%20Sectorial/01=Indicadores/index.php>> [consultado: 10 de marzo 2014]
- KACHANOSKI, R.G.; DE JONG, E.; VAN WESENBECK, I.J. 1990. Field scale patterns of soil water storage from non-contacting measurements of bulk electrical conductivity. *Canadian Journal of Soil Science*. 70(3):537-542.

- KIESSLING, R.J. 2012. Cambios en algunas propiedades químicas y físicas del suelo en sistemas productivos del sudoeste bonaerense: efecto del sistema de labranza, nivel de fertilización nitrogenada y pastoreo directo. Tesis de Magister en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca.
- KOOEVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. 1983. Elements of Soil Physics. Department of Soil Science and Plant Nutrition, Agricultural. University of Wageningen, Wageningen, The Netherlands. 229 p.
- KRÜGER, H.R. 1995. La siembra directa en la República Argentina. Región Semiárida Pampeana. Ponencias. Seminario Internacional sobre Avances en Siembra Directa (No. IICA-PROCISUR DIALOGO 44). IICA, Montevideo (Uruguay). Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agropecuario del Cono Sur-PROCISUR. pp. 58-62.
- KRÜGER, H.R. 1996. Labranza en la región semiárida-subhúmeda bonaerense sur. Labranzas en la región semiárida argentina. INTA. Centro Reg. La Pampa-San Luis EEA Ing. Agr. Guillermo Covas, La Pampa.
- KRÜGER, H.R.; AGAMENNONI, R.; RIPOL, M. 2005. Siembra Directa en el Sur de la Región Semiárida Pampeana. INTA EEA Hilario Ascasubi. Boletín Técnico N°14.
- KRÜGER, H.R.; VENANZI, S.; SA PEREIRA, E. 2008. Efecto del pastoreo sobre la resistencia mecánica del suelo en sistemas de producción bajo siembra directa continúa. Ciencia del suelo. 26(2):211-217.
- LANZANOVA, M.E.; NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; ELTZ, F.L.F.; AMADO, T.J.C. REINERT, D.J. 2007. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do solo. 31(5):1131-1140.
- LEBERT, M.; BRUNOTTE, J.; SOMMER, C.; BÖKEN, H. 2006. Bodengefüge gegen Verdichtungen schützen–Lösungsansätze für den Schutz landwirtschaftlich genutzter Böden. Journal of Plant Nutrition and Soil Science. 169: 633–641.
- LEING, A.K.; GARG, A.; NG WANGWAI, C. 2015. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil. Engineering Geology. 193:183-197.
- Ley del Sudoeste. Fundamentación para la creación de la Ley del Sudoeste 13647. La Plata, Bs. As. Argentina. [en línea] <http://www.maa.gba.gov.ar/dir_econo_rural/plan_des_sudoeste.php> [consultado: 10 de agosto 2015]
- LINDEN, V. D; JEURISSEN, L.J.J.; VEEN J.A.; SCHIPPERS, B. 1989. Turnover of the soil microbial biomass as influenced by soil compaction. En: Henriksen, H.; Hanses, J. (eds.). Nitrogen in organic wastes applied to soils. Londres, Inglaterra. pp 25–33.
- LIPIEC, J.; HATANO, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop. Geoderma. 116(1):107-136.

- LUND, E.D.; CHRISTY, D.; DRUMMOND, P.E. 1998. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. In: International conference on precision agriculture proceedings. St. Paul, Minnesota, USA. pp. 1089-1100.
- LUXMOORE, R.J., 1981. Micro-, meso-, and macroporosity of soil. *Soil Science Society of America Journal*, 45(3), 671-672.
- MAPFUMO, E. 1997. Soil and plant response to compaction. Tesis de "*Philosophy Doctor in Soil Science*". University of Alberta, Edmonton, Canadá. 272 p.
- MARTÍNEZ, D.; LANDINI, A.; SOZA, E.; HEREDIA, O.; SAINATO, C. 2010. Efecto del pisoteo animal sobre las propiedades de un suelo. Parte I: densidad aparente, humedad, resistencia a la penetración, y modelos asociados. *Agro-Ciencia*. 27(1):15-27.
- MARTINO, D.L. 2001. Manejo de Restricciones Físicas del Suelo en Sistemas de Siembra Directa. Siembra Directa en el Cono Sur. Coordinador Roberto Diaz Rossello. Montevideo. PROCISUR. 2001. 450 p.
- MATERECHERA, S.A.; DEXTER, A. R.; ALSON, A.M. 1991. Penetration of very strong soils by seedling of different plant species. *Plant and Soil*. 135(1):31-41.
- MCGARRY, D.; SHARP, G. 2001. A rapid, immediate, farmer-usable method of assessing soil structure condition to support conservation. En: Garcia Torres, L.; Benites, J.; Martínez-Vilela, A.; Holgado-Cabrera, A. *Conservation Agriculture*. Netherlands. pp. 375-380.
- MISRA, R.K.; PADHI, J. 2014. Assessing field-scale soil water distribution with electromagnetic induction method. *Journal of Hydrology*. 516:200-209.
- MORÁN, M. S.; COSTA, J.L; CALVIÑO, P.; RODRIGUEZ J.C. 2000. Influencia del pastoreo de verdes sobre algunas propiedades físicas del suelo y del cultivo de soja en un sistema de siembra directa. *17° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. 11-14 abril. Mar del Plata, Argentina.
- MORALES, L. A. 2004. Análisis estadísticos y geoestadísticos en diferentes estadios de algunas propiedades de un suelo bajo cultivo de arroz. Tesis Doctoral, Universidad de la Coruña, Facultad de Ciencias Área de Edafología y Química Agrícola. 469 p.
- MUÑOZ, J.D.; MARTÍNEZ, L.J.; GIRALDO R. 2006. Variabilidad espacial de propiedades edáficas y su relación con el rendimiento en un cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Agronomía Colombiana*. 24(2):355-366.
- MWENDERA, E.; SALEEM, M. 1997. Hydrologic response to cattle grazing in the Ethiopian highlands. *Agriculture, ecosystems & environment*. 64(1):33-41.
- NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.; ERH, K. T. 1973. Spatial variability of field-measured soil-water properties. *Hilgardia*. 42(7):215-259.
- OADES, J.M. 1993. The role of biology in the formation, stabilization and degradation of soil structure. *Geoderma*. 56: 377-400.

- OLIVEIRA, L. B. 1968. Determinação da macro e microporosidade pela "mesa de tensão" em amostras de solo com estrutura indeformada. Pesquisa agropecuária brasileira. 3(1):197-200.
- PABIN, J.; LIPIEC, J.; WLODEK, S.; BISKUPSKY, A.; KAUS, A. 1998. Critical soil bulk density and strength for pea root growth as related to other soil factors. Soil and Tillage Research. 43:206-208.
- PAPANICOLAOU, T.N; ELHAKEEM, M.; WILSON, C.; BURRAS, C.L.; WEST, L.T; LIN, H.; CLARK, B.; ONEA, B. 2015. Spatial variability of saturated hydraulic conductivity at the hillslope scale: Understanding the role of land management and erosional effect, Geoderma, 243:58-68.
- PARRA, B. 2006. Efecto del uso y labranzas sobre la distribución de tamaño de poros en un Hapludol Típico. Actas XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 19-22 Septiembre. Salta, Jujuy.
- PERDOMINGO, A.J. 2004. Sustentabilidad Ambiental de los sistemas de Cría. Conferencia IV Jornadas Nacionales de Cría Bovina Intensiva. Venado Tuerto, Santa Fe, Argentina.[en línea] <http://www.produccion-animal.com.ar/sustentabilidad/10-sustentabilidad_cria.pdf> [consulta: 7 octubre 2015]
- PERROUX, K. M.; WHITE, I. 1988. Designs for disc permeameters. Soil Science Society of America Journal. 52(5):1205-1215.
- PEBESMA, E.J., 2004. Multivariable geostatistics in S: the gstat package. Computers & Geosciences. 30:683-691.
- PEBESMA, E.J., R.S. BIVAND, 2005. Classes and methods for spatial data in R. [en línea] <<http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>> [consulta: 7 septiembre 2014]
- PIETOLA, L.; HORN, R.; YLI-HALLA, M. 2005. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. Soil and Tillage Research. 82(1):99-108.
- QUIROGA, A.; FERNÁNDEZ, R.; NOELLEMAYER, E. 2009. Grazing effect on soil properties in conventional and no-till systems. Soil and Tillage Research. 105(1):164-170.
- QUIROGA, A.; ROMANO, N. 2012. El sistema suelo y características del intercambio de iones. En: Quiroga, A; Bono, A. (eds.), Manual de fertilidad y evaluación de suelos., B. Ediciones INTA Anguil. Anguil, Argentina. pp. 11-18.
- R Core Team. 2013. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. En: <http://www.R-project.org/> [consulta: 7 abril 2014]
- REARTE, D. 2010. Situación actual y prospectiva de la producción de carne vacuna. INTA Programa Nacional de Carnes. [en línea] <<http://www.inta.gov.ar/balcarce/carnes>> [consulta: 8 diciembre 2013]

- RIPOLL, M., AGAMENONNI, R.; KRÜGER, H.R. 2001. Producción de trigo candeal en el sudoeste y sur de la Pcia. De Buenos Aires. I. Sistema de labranza. Actas V Congreso Argentino de Trigo. Villa Carlos Paz, Córdoba.
- RONAYNE, M.J.; HOUGHTON, T.B.; STEDNICK, J.D. 2012. Field characterization of hydraulic conductivity in a heterogeneous alpine glacial till. *Journal of Hydrology*. 458: 103-109.
- ROUNDY, B.; KEYS, R.; WINKEL, V. 1990. Soil response to cattle trampling and mechanical seedbed preparation. *Arid Land Research and Management*, 4(4):233-242.
- RUDEL, T.K. 2007. Changing agents of deforestation: From state-initiated to enterprise driven processes, 1970-2000. *Land use policy*, 24(1):35-41.
- RUSSELL, R. S.; GOSS, M.J. 1974. Physical aspects of soil fertility, the response of roots to mechanical impedance. *Netherlands Journal of Agricultural Science*. 22:305-318.
- SAMPER, F. J.; CARRERA J. 1990. Geoestadística. Aplicaciones a la Hidrogeología Subterránea. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- SASAL, M. C.; ANDRIULO, A. E. 2005. Cambios en la porosidad edáfica bajo siembra directa por la introducción de *Raphanus sativus* L. (Nabo forrajero). *Revista de Investigaciones Agropecuarias*. 34:131-150.
- SATORRE, E.H. 2005. Cambios tecnológicos en la agricultura argentina actual. *Ciencia Hoy*. 15(87):24-31.
- SEVILLA, G.; PASINATO, A. 2006. El rol de la ganadería en los sistemas mixtos. Galarza Expone 2006. 9, 10 y 11 de junio 2006. Galarza, Entre Ríos, Argentina. [en línea] <http://www.produccionanimal.com.ar/empresa_agropecuaria/empresa_agropecuaria/55-ganaderia_en_sistemas_mixtos.pdf> [consulta: 15 enero 2014]
- SCAPINI, C.A; BOENO, M.; DALVAN J.R.; RESTLE, J; BUENO M. B.; FONTINELLI, F. 1997. Efeito do pisoteio animal, no terceiro ano consecutivo, sobre algumas propriedades físicas do solo e produtividade do milho em solo sob plantio direto e convencional. 26° Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Rio de Janeiro, Brazil. [en línea] <http://w3.ufsm.br/ppgcs/congressos/XXVI_Congresso_Brasileiro/RQ718.pdf> [consulta: 15 julio 2014]
- SCHMIDT, E.; AMIOTTI, N. 2012. Estabilidad Estructural y Compactación relativa bajo Siembra Directa y Labranza Reducida. Actas 19° Congreso Latinoamérica de la Ciencia del Suelo, 23° Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. 16-20 de abril. Mar del Plata, Argentina.
- SCHMIDT, E. 2015. Modificaciones estructurales y funcionales de epipedones mólicos en suelos de la región pampeana semiárida bajo siembra directa continúa. Tesis de magister en ciencias agrarias. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. 113 p.

- SCHOLL, P.; LEITNER, D.; KAMMERER, G.; LOISKANDL, W.; KAUL, H.P.; BODNER, G. 2014. Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column. *Plant Soil*. 381(1-2), 193–213.
- SCHLOEDER, C.A.; ZIMMERMAN, N.E; JACOBS, M.J. 2001. Comparison of methods for interpolating soil properties using limited data. *Soil Science Society of America Journal*. 65(2):470-479.
- SHEETS, K.R.; HENDRICKX, J.M.H. 1995. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water resources research*. 31(10): 2401-2409.
- SILVA, V. R.; REINERT, D. J; REICHERT, J. M. 2010. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 24(1):191-199.
- SMITH, CW.; JOHNSTON, M.A.; LORENT. 1997. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. II. Soil properties affecting compactability and compressibility. *Soil and Tillage Research*, 43(3):335-354.
- SOANE, B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil and Tillage Research*. 16:179-202.
- SOANE, B.D.; OUWERKERK, C. 1994. *Compaction in Crop Production. Developments in Agricultural Engineering Series*. Elsevier Science. 684 p.
- SPARLING, G. P.; SCHIPPER, L. A. 2002. Soil quality at a National Scale in New Zealand. *Journal of Environmental Quality*. 31(6):1848-1857.
- STAKMAN, W.P.; VALK, G.A.; HARST, G.G. 1969. Determination of moisture retention curves. I. Sandbox apparatus, range pF 0 and 2,7. *Publications of the Institute for Land and Water Management Research*. Wageningen, Países Bajos.
- STRUDLEY, M; GREEN, T.; ASCOUGH, J. 2008. Tillage effects on soil hydraulic properties in space and time: State of the science. *Soil and Tillage Research*. 99(1):4-48.
- STUDDERT, G.A.; ECHEVERRÍA, H.E. 2006. Relación entre el cultivo antecesor y la disponibilidad de nitrógeno para el trigo en la rotación. *Ciencia del Suelo*. 24(1): 89-96.
- SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S.T; KITCHEN, N.R. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*. 31(3):239-264.
- TABOADA, M.A.; BARBOSA, O.A.; RODRIGUEZ, M.B.; COSENTINO, D.J. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma*. 123:233–244.

- TABOADA, M. 2007. Efectos del pisoteo y pastoreo animal sobre suelos en siembra directa. 4º Simposio de Ganadería en Siembra Directa. AAPRESID. Potrero de los Funes, San Luis, [en línea] <http://www.produccionbovina.com.ar/suelos_ganaderos/49-efectos_pisoteo.pdf> [consulta: 7 de octubre 2014]
- TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FROMETA, M.E.; ITZA, C.A. 2004. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferrasol in Western Cuba. *Soil and Tillage Research*, 76(2): 95-103.
- TALEISNIK, E.; PEYRANO, G.; CORDOBA, A.; ARIAS, C. 1999. Water retention capacity in root segments differing in the degree of exodermis development. *Ann. Bot.* 83 (1): 19–27.
- TERASHIMA, E.; FUJII, E.; MISHIMA, K. 1999. Experimental studies on the effect of trampling on the root system of seedlings of *Zelkova serrata* Makino. *Technical Bulletin of Faculty of Horticulture. Chiba University.* (53):85-92.
- THOMAS, G.W.; HASZLER, G.R.; BLEVINS, R.I. 1996. The effect of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the proctor test. *Soil Science.* 161(8):502-508.
- TOLLNER, E.W.; CALVERT, G.V.; LANGDALE, G. 1990. Animal trampling effects on soil physical properties of two Southeastern U.S. ultisols. *Agriculture, ecosystems & environment.* 33(1):75-87.
- TOURN, M.; SOZA, E.; BOTTA, G.; METE, A. 2003. Direct maize seeding. Effects of residue clearance on implant efficiency. *Spanish Journal of Agricultural Research.* 1:99–103.
- TRAORÉ, O.; GROLEAU-RENAUD, V.; PLANTUREUX, S.; TUBEILEH, A.; BOEUF-TREMBLAY, V. 2000. Effect of root mucilage and modelled root exudates on soil structure. *European Journal of Soil Science.* 51 (4), 575–581.
- TREIN, C.R.; COGO, N.P.; LEVIEN, R. 1991. Métodos de preparo do solo na cultura do milho e ressemeadura do trevo na rotação aveia + trevo/milho, após pastejo intensivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo.* 15:105-111.
- VAHHABI, M.R; RAHIMZADEGAN, R.; BASSIRI, M. 2001. Determining and comparing infiltration characteristics in clay soils in grazed vs. non-grazed range sites in Fereydan Region of Isfahan. *Iranian Journal of Natural Resources.* 54(1):75-91.
- VENANZI, S.; GALANTINI, J.; KRÜGER, H. 2004. Pastoreo en Siembra Directa y Crecimiento de Soja. *Actas 19º Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo.* 22-25 de Junio. Paraná, Entre Ríos, Argentina.
- VENANZI, S.; VALATI, A.; KRÜGER, H. 2007. Crecimiento temprano en trigo en función de la densidad aparente del suelo. *INTA-EEA Bordenave.* [en línea] <http://www.agrositio.com/vertex/vertex_print.asp?id=32908&se=1000> [consulta: 25 abril 2014].

- VIEIRA S. R. 2000. Geoestadística em estudos de variabilidade espacial do solo. En: Novaris, R. F.; Alvarez, V. H.; Schaefer G. R. (eds.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. pp. 1-54.
- VIEIRA S. R., J. MILLETE, G. C. TOPP AND W. D. REYNOLDS. 2002. Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data. En: Alvarez V. V. H.; Schaefer C. E., Barros N. F., Mello, J. W. V.; Costa J. M. Tópicos em ciência do solo. pp. 1-45.
- VIGLIZZO, E., JOBBÁGY E. 2006. Expansión de la frontera agropecuaria en Argentina y su Impacto Ecológico-Ambiental. Ediciones INTA 2006. Santa Rosa, La Pampa, Argentina. 102 p.
- WALKLEY, A., BLACK, I.A. 1934. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. Soil Science. 37:29–37.
- WARREN, S.D.; NEVILL, M.B.; BLACKBURN, W.H.; GARZA, N.E. 1986. Soil response to trampling under intensive rotation grazing. Soil Science Society of America Journal. 50(5):1336-1341.
- WEST, L.T.; ABREU, M.A.; BISHOP, J.P. 2008. Saturated hydraulic conductivity of soils in the Southern Piedmont of Georgia, USA: field evaluation and relation to horizon and landscape properties. Catena. 73(2):174-179.
- WOODING, R. A. 1968. Steady infiltration from circular pond. Water resources research. 4(6):1259-1273.
- ZAMORA, M.; DUHALDE, J.M; CARRASCO, N.; BAEZ, A; JENSEN, M.; DI NECIO, L. 2006. Pastoreo de Verdes de Invierno Bajo Siembra Directa: Efectos sobre el suelo y Rendimiento de los Cultivos Posteriores. Producción de Carne. INTA EEA Barrow, Tres Arroyos, Argentina. [en línea] <http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/pasturas_cultivadas_verdeos_invierno/52-pastoreo.pdf> [consulta: 10 octubre 2015]
- ZHANG, S., GRIP, H., LÖVDAHL, L. 2006. Effect of soil compaction on hydraulic properties of two loess soils in China. Soil and Tillage Research. 90(1):117-125.
- ZHAO, Y.; PETH, S.; HORN, R.; MMELBEIN, J.K.; KETZER, B.; GAO, Y.; DOERNER, J.; BERNHOFER, C.; PENG, X. 2010. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland. Soil and Tillage Research. 109(2):75-86.