

¿PUEDE EL LABOREO PROFUNDO Y LA APLICACIÓN DE YESO PROMOVER LA RECUPERACION DE PASTURAS DE ALFALFA EN EL VALLE DE LERMA?

¿Can deep tillage and gypsum promote the recovery of alfalfa pastures in the Lerma Valley?

Caruso, H.¹, Gieco, J.² y Martínez, M.³

Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta, Argentina
Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Nacional del Litoral, Argentina
Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, EEA Salta, INTA Cerrillos, Argentina

RESUMEN

El objetivo fue evaluar el efecto del laboreo profundo y la adición de yeso sobre el rendimiento de pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma. Se analizó el efecto conjunto de dos factores (laboreo y yeso), organizados en un diseño en bloques completamente aleatorizado (n=5), con arreglo en parcelas divididas y medidas repetidas en el tiempo. El laboreo se evaluó en dos niveles (Sin Laboreo (SL) y Con Laboreo (CL)) y el yeso en tres niveles (0, 100 y 200 kg ha⁻¹). El laboreo se realizó con un subsolador de dos timones angulados y distanciados a 90 cm y a 40 cm de profundidad. Se regó y se aplicó al voleo yeso agrícola peleteado (S=18,5%; Ca= 23,3%) sobre la superficie del suelo. El experimento se estableció sobre una pastura de tres años con 20 plantas m⁻² y densidad aparente superior a 1,6 g cm⁻³. En los dos años siguientes, se analizó la densidad de plantas, oferta forrajera, densidad aparente, estabilidad de los agregados, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y resistencia a la penetración. No se observaron diferencias significativas en la producción de forraje de la pastura. Con una población menor al umbral de 30 plantas m⁻² habría ausencia en la respuesta de producción de forraje. El suelo presentó restricciones físicas que no fueron solucionadas con el laboreo profundo y la aplicación de yeso. Los valores de densidad superaron el umbral de densidad crítica hasta los 30 cm de profundidad. La resistencia del suelo limitaría el crecimiento de las raíces a partir de los 10 cm de profundidad. El uso conjunto de un subsolador con timones angulados y adición de yeso no mejoró la producción forrajera ni las condiciones físicas del suelo en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma.

Palabras clave. alfalfa, compactación del suelo, densidad aparente, subsolador, yeso.

SUMMARY

The objective was to evaluate the effect of deep tillage and the addition of gypsum on the yield of alfalfa pastures in the Lerma Valley. The joint effect of two factors (tillage and gypsum), organized in a completely randomized block design (n=5), was analyzed, according to divided plots and repeated measures over time. Tillage was evaluated at two levels (without tillage (SL), with tillage (CL)) and gypsum at three levels (0, 100 and 200 kg ha⁻¹). The tillage was carried out with a subsoiler with two angled rudders 90 cm and 40 cm deep. The plots were irrigated and pelleted agricultural gypsum (S=18.5%; Ca=23.3%) was applied on the soil surface. The experiment was established on a three-year-old pasture with 20 plants m⁻² and a bulk density greater than 1.6 g cm⁻³. In the following two years, plant density, forage supply, bulk density, aggregate stability, organic matter, pH, electrical conductivity and resistance to penetration were analyzed. No significant differences were observed in pasture production. With a population lower than the threshold of 30 plants m⁻², there would be an absence in the forage production response. The soil presented physical restrictions that were not solved with deep tillage and the application of gypsum. The bulk density values exceeded the critical density threshold up to 30 cm deep. The soil strength would limit the growth of the roots from a depth of 10 cm. The joint use of a subsoiler with angled rudders and the addition of gypsum did not improve forage production or soil physical conditions of alfalfa pastures in the Lerma Valley.

Key words. alfalfa, soil compaction, bulk density, subsoiler, gypsum.

Recibido: febrero 2020

Aceptado: septiembre 2020

¹ Ing. Agr., Mgter., Becario Doctoral, Docente regular - Introducción a la Producción Animal - UNSa. Av. Bolivia 5150 (4400) Salta, Argentina. vhcarru@gmail.com

² Ing. Agr., MSc., Dr. Docente regular - Forrajes - UNL. Av. Kreder 2805 (3080) Esperanza, Santa Fe, Argentina. Jorgegieco@gmail.com

³ Ing. Agr., MSc. Dr. Técnico EEA Salta, INTA Cerrillos, RN 68, km 172 (4403) Cerrillos, Salta, Argentina. gmarcelamartinez@gmail.com

Introducción

La alfalfa es la pastura más difundida en distintos sistemas ganaderos del Valle de Lerma (Prov. de Salta, Argentina). Su persistencia depende de la supervivencia de la población original (Bouton, 2012). En esta región, se ha reportado que la población de alfalfa puede disminuir desde aproximadamente 150 plantas m^{-2} al primer pastoreo a menos de 30 plantas m^{-2} al inicio del segundo año (Caruso et al., 2018); manteniéndose con pocos cambios en años posteriores (Pereyra et al., 2011). Esta población es menor a la reportada sobre Molisoles en la región central de Santa Fe, donde se indican densidades de hasta 250 plantas m^{-2} (Mattera et al., 2013). La alfalfa no prospera satisfactoriamente con capas de suelo compactado. La compactación es la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él (es decir laboreo, tránsito de maquinarias y pisoteo de los animales). El nivel de compactación que puede alcanzar un suelo está relacionado con la distribución del tamaño de partículas y el contenido de materia orgánica. La compactación se puede caracterizar mediante la densidad aparente y la resistencia mecánica del suelo (Moro et al., 2004). Los suelos francos, con amplio rango en la distribución del tamaño de partículas y bajo contenido de materia orgánica, son más susceptibles a la compactación. Pereyra et al. (2011) describen en suelos francos sin estructura y pastoreados, con más de 200 vacas en ordeño ha^{-1} , incrementos continuos de la densidad aparente del suelo en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma (desde 1,7 $g\ cm^{-3}$ a los 10 cm de profundidad hasta 1,8 $g\ cm^{-3}$ a los 30 cm). Ante estos valores de densidad aparente correspondería la recomendación productiva usual de remoción de la pastura y establecimiento de un nuevo cultivo, o la aplicación de técnicas agronómicas para mejorar su producción (Canevari y Putnad, 2007). El laboreo profundo (o subsolado) es la descompactación mecánica del suelo sin modificar la superficie, la cual se puede realizar mediante un descompactador con brazos angulados hasta los 40 cm de profundidad (Alvarez et al., 2006). De esta forma, la densidad aparente del suelo no afectaría el crecimiento de las raíces (Daddow y Warrington, 1983). Asimismo, el aporte de calcio a través de la aplicación de yeso puede estabilizar las partículas finas del suelo y evitar su empaquetamiento.

Hasta el momento, se desconocen los efectos de la aplicación conjunta de laboreo profundo y adición de yeso para ampliar el perfil de suelo en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma. Se plantea como hipótesis que el uso conjunto de un descompactador con timones angulados y la aplicación de yeso incrementa la producción de forraje de la pastura de alfalfa al mejorar, en forma sostenida, las condiciones físicas del suelo. Esta hipótesis se probará si se cumplen los siguientes supuestos: a) la cantidad de plantas de alfalfa al inicio del experimento no afecta la producción de forraje, b) la densidad aparente y la resistencia del suelo alcanza valores óptimos para la producción de la pastura, c) la estabilidad de los agregados del suelo se incrementa en

forma duradera y d) no se generan modificaciones en el pH y la conductividad eléctrica del suelo. En base a esto se plantea como objetivo evaluar el efecto del laboreo profundo y la adición de yeso sobre el rendimiento de pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma, Prov. de Salta, Argentina.

Materiales y Métodos

La evaluación se desarrolló en la EEA INTA Cerrillos, en el Valle de Lerma, Provincia de Salta, Argentina; dentro de la región agroeconómica denominada valles templados de producción intensiva, a 16 km de la ciudad de Salta (24°53'39''S, 65°28'14''O). La temperatura media del mes más frío (julio) es de 10,6°C mientras que la del mes más cálido (diciembre) es de 21,4 °C. El 89% de las precipitaciones se concentran entre noviembre y marzo, totalizando 686,7 mm (Arias y Bianchi, 1996). La pastura recibió riego suplementario (aproximadamente 500 mm) durante el período evaluado, ya que las precipitaciones no cubren la demanda anual del cultivo. El experimento se realizó sobre una pastura de alfalfa de tres años de la variedad Armona, sobre un suelo *Eutocrepte típico* (Vargas Gil, 1990). Al inicio del experimento, se caracterizó como masivo, sin estructura, de textura franca (38% de arena, 45% de limo y 17% de arcilla), con distribución del tamaño de partícula no uniforme, 22 $g\ kg^{-1}$ de materia orgánica, 12 $mg\ kg^{-1}$ de fósforo, pH 7,0, conductividad eléctrica de 0,15 $mmhos\ cm^{-1}$, estabilidad de los agregados 27,5% y densidad aparente hasta 5 cm=1,64 $g\ cm^{-3}$ y entre 5 y 10 cm=1,8 $g\ cm^{-3}$. No se realizó fertilización fosforada para no afectar los resultados y el contenido de fósforo se consideró bueno a regular, con pocas limitaciones (Ortega y Corbalán, 2001).

Se evaluó el efecto conjunto de dos factores (laboreo profundo y aplicación de yeso) organizados en un diseño en bloques completamente aleatorizados (n=5), con arreglo en parcelas divididas y medidas repetidas en el tiempo. El factor laboreo se asignó al azar a las parcelas principales, mientras que el factor yeso se asignó al azar en las sub-parcelas, quedando determinadas 30 unidades experimentales (3x5 m). El laboreo se evaluó en dos niveles (sin y con laboreo) y el yeso con tres niveles (0, 100 y 200 $kg\ ha^{-1}$). Se realizó un corte de uniformidad previo a la aplicación de los tratamientos. El laboreo se realizó el 09/05/2016 con un descompactador con dos timones distanciados a 90 cm y a 40 cm de profundidad. Posteriormente se regó. Luego, se realizó la aplicación de yeso agrícola peleteado (marca Profertil-INTA, Argentina; S=18,5%; Ca= 23,3%), al voleo sobre la superficie del suelo, el 22/06/2016. El pH se ubicó en 6,9, siendo el límite superior del rango óptimo para el cultivo de alfalfa.

En el centro de cada unidad experimental se estableció un punto fijo de muestreo alrededor del cual se determinaron las variables de respuesta: densidad de plantas, producción de materia seca, densidad aparente (0-5, 5-10, 10-20 y 20-30 cm), estabilidad de los agregados, materia orgánica, pH, conductividad eléctrica y resistencia

mecánica del suelo. La densidad de plantas se cuantificó en dos momentos, contando el número de coronas sobre el suelo, dentro de un marco de 0,25 m², el 25/7/16 (luego de aplicados los tratamientos) y 17/11/17 (al final de la evaluación). La producción de materia seca se estimó con un marco de 1 m², cortando la pastura a 5 cm de altura al inicio de floración o con 4 cm de brotes basales, en 4 oportunidades en 2016 y en 5 en 2017 (25/7/16, 12/9/16, 24/10/16, 14/12/2016; 14/2/17, 2/3/17, 9/5/17, 2/10/17, 17/11/2017). El material recolectado se pesó en fresco, se obtuvo una alícuota para determinar el porcentaje de materia seca y se calculó el peso seco.

La densidad aparente del suelo (dap) se determinó con muestras no disturbadas. La dap 0-5 cm y dap 5-10 cm se estimaron mediante el uso de un cilindro de 4 cm de diámetro (USDA, 1999), en los mismos momentos que las mediciones de densidad de plantas. La dap 10-20 cm y la dap 20-30 cm se cuantificaron con la obtención de muestras mediante un penetrómetro de uso extendido (según Micucci y Menardi, 2004), en el mismo momento que se determinó la resistencia mecánica del suelo, al final de la evaluación (17/11/17). La estabilidad de los agregados del suelo se determinó con el método de microtamices (Corvalán et al., 2000), materia orgánica con el método de Walkey y Black (Nelson y Sommers, 1996), pH con pHmetro en dilución de agua 1:2,5 (Kloster et al., 2008), conductividad eléctrica con un potenciómetro en dilución de agua 1:2,5 (Ortega y Corvalán, 2001) y la distribución del tamaño de partículas por el método de Bouyoucos (Gee y Bauder, 1986). Para las mencionadas variables, se tomaron muestras compuestas de suelo (0-20cm) obtenidas en dos oportunidades en simultáneo al recuento de plantas. Adicionalmente, se calcularon el coeficiente de uniformidad, densidad relativa y el índice de materia orgánica, según las siguientes fórmulas:

a) Coeficiente de uniformidad (Mbonimpa et al., 2002) [1],

$$Cu = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad [1]$$

Donde d60 y d10: diámetros correspondientes al 60% y 10% del peso del suelo en la curva de distribución del tamaño de partículas respectivamente.

b) Densidad relativa (Hakansson y Lipiec, 2000) [2],

$$DR = \left(\frac{dap}{D_{Max}} \right) 100 \quad [2]$$

Donde dap: densidad del suelo en un momento determinado y DMax: densidad máxima.

La DMax se calculó a partir de la ecuación ajustada por Marcolin y Klein (2011) [3],

$$D_{Max} = 2,03133855 - \left(\left(0,00320878 \left(\frac{MO}{10} \right) - (0,00076508 \text{ arcilla}) \right) \right) \quad [3]$$

Donde MO: contenido de materia orgánica (g kg⁻¹) y arcilla: contenido de arcilla (%).

c) El índice de materia orgánica (IMO) (Quiroga et al., 2006) [4],

$$IMO = \left(\frac{MO_{10}}{\text{arcilla} + \text{limo}} \right) \quad [4]$$

Donde MO: contenido de materia orgánica (g kg⁻¹), limo: contenido de limo (%) y arcilla: contenido de arcilla (%).

Para el análisis estadístico se propusieron modelos lineales generales y mixtos: AIC (*Akaike's Information Criterion*), BIC (*Schwarz's Bayesian Information Criterion*) y pruebas de cociente de verosimilitud restringida; eligiendo en cada caso el modelo de mejor ajuste a la estructura de covarianza de los datos. Se consideró como efecto fijo el laboreo, la dosis de yeso, el tiempo y sus interacciones; y como efecto aleatorio, el de bloques. Se realizó la comparación de medias para los efectos fijos usando la prueba DGC. La densidad de plantas se analizó con un modelo autoregresivo de orden 1 y varianzas residuales homogéneas en el tiempo. La producción de materia seca con un modelo sin estructura y varianzas heterogéneas en el tiempo. Las variables de suelo (densidad aparente, estabilidad de los agregados, materia orgánica, pH y conductividad eléctrica) con un modelo sin estructura y varianzas residuales homogéneas en el tiempo. Se utilizó el software informático *InfoStat* (Balzarini et al., 2008).

Resultados

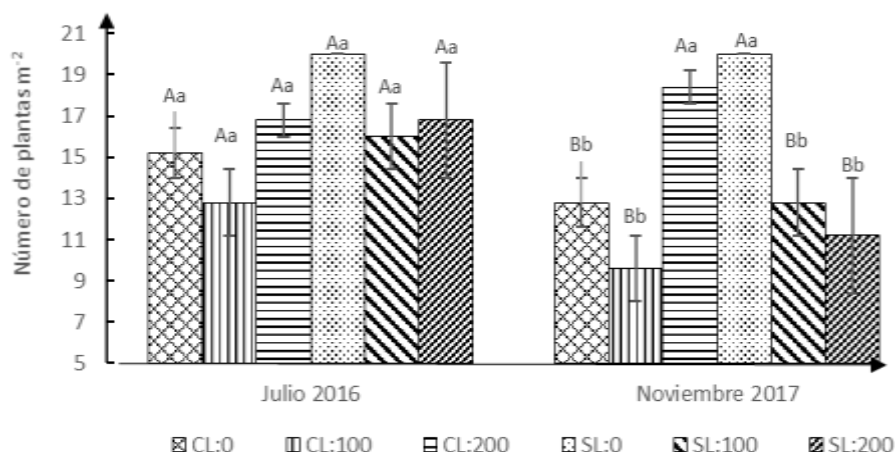
Tamaño de partículas del suelo

La primera evaluación consistió en controlar la uniformidad de la textura de las unidades experimentales. Los resultados indican que las parcelas presentaron un coeficiente de variación del 3% en limo, 4% en arena y 11% en arcilla, con máximos y mínimos que no modificaron la clase textural de cada una de las parcelas experimentales; siendo el coeficiente de uniformidad igual a 21%. El suelo presenta un amplio rango de tamaño de partículas (arena gruesa 16%, arena media 11%, arena fina 11%, limo grueso 23%, limo fino 22% y arcilla 17%).

Densidad de plantas y producción de forraje

No se observaron modificaciones en la densidad de plantas en julio 2016, en ninguna de las combinaciones de laboreo y yeso, detectándose diferencias significativas al final de la evaluación. En general, el número de plantas m⁻² disminuyó 20% al final de la evaluación; y solo la combinación de subsolado con la adición de 200 kg ha⁻¹ de yeso permitió mantener el número de plantas similar a la situación control (Figura 1). Se observaron diferencias significativas en laboreo (p=0,003), tiempo (p<0,001), laboreo*dosis (p=0,012), laboreo*tiempo (p=0,001), dosis*tiempo (p=0,041) y laboreo*dosis*tiempo (p=0,002) (Figura 1).

Se observaron diferencias significativas en la producción de materia seca entre tratamientos solo en la medición de julio 2016, las que pudieron estar asociadas a cambios en el sistema radicular producidos por el subsolador, mientras que en los cortes restantes la producción de materia seca



Letras mayúsculas distintas para cada fecha y letras minúsculas distintas entre fechas indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Los valores son media \pm 1 error estándar.

Figura 1. Densidad de plantas de alfalfa (Nro. m^{-2}) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 $kg\ ha^{-1}$).

Figure 1. Density of alfalfa plants (Nro. m^{-2}) for two years (2016-2017) under the effects of deep tillage (SL: without tillage and CL: with tillage) and three levels of gypsum (0, 100 and 200 $kg\ ha^{-1}$).

fue similar en todas las combinaciones de laboreo y yeso (Cuadro 1). La pastura presentó crecimiento estacional, el mayor rendimiento se determinó en diciembre de 2016, mientras que los menores en mayo, marzo y febrero de

2017. Se encontraron diferencias significativas en el laboreo ($p=0,032$); tiempo ($p < 0,001$); yeso*tiempo ($p=0,041$); laboreo*tiempo ($p=0,001$); laboreo*yeso ($p=0,012$) y laboreo*yeso*tiempo ($p=0,002$) (Cuadro1).

Cuadro 1. Producción de materia seca de alfalfa ($g\ m^{-2}$) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo) y tres niveles de aplicación de yeso (0, 100 y 200 $kg\ ha^{-1}$).

Table 1. Dry matter production of alfalfa ($g\ m^{-2}$) ($g\ m^{-2}$) for two years (2016-2017) under the effects of deep tillage (SL: without tillage and CL: with tillage) and three levels of gypsum application (0, 100 and 200 $kg\ ha^{-1}$).

Laboreo	Yeso	2016				2017				
		julio	setiembre	octubre	diciembre	febrero	marzo	mayo	octubre	noviembre
SL	0	132 \pm 15Ab	118 \pm 25Ab	141 \pm 18Ab	259 \pm 22Aa	60 \pm 18Ac	80 \pm 9Ac	29 \pm 5Ad	117 \pm 18Ab	89 \pm 27Ab
	100	66 \pm 15Bc	164 \pm 25Ab	112 \pm 18Ab	247 \pm 22Aa	72 \pm 17Ac	70 \pm 9Ac	20 \pm 5Ad	119 \pm 18Ab	95 \pm 29Ab
	200	46 \pm 15Bc	120 \pm 24Ab	123 \pm 15Ab	215 \pm 19Aa	72 \pm 16Ac	47 \pm 7Ac	27 \pm 5Ad	154 \pm 15Ab	102 \pm 29Ab
CL	0	35 \pm 15Cd	112 \pm 25Ab	116 \pm 17Ab	249 \pm 21Aa	79 \pm 17Ac	52 \pm 8Ac	18 \pm 5Ad	148 \pm 17Ab	104 \pm 29Ab
	100	31 \pm 15 Dc	159 \pm 25Ab	93 \pm 17Ab	213 \pm 21Aa	78 \pm 17Ac	47 \pm 8Ac	16 \pm 5Ad	105 \pm 17Ab	92 \pm 26Ab
	200	44 \pm 15Bc	141 \pm 25Ab	105 \pm 18Ab	230 \pm 22Aa	64 \pm 18Ac	57 \pm 9Ac	21 \pm 5Ad	128 \pm 18Ab	98 \pm 27Ab

Letras mayúsculas distintas para cada fecha y letras minúsculas distintas para cada tratamiento indican diferencias significativas ($p < 0,05$). Los valores son media \pm 1 error estándar.

Propiedades del suelo

El tratamiento con subsolado inicialmente disminuyó significativamente 4% la dap 0-5 cm, desde 1,64 (sin laboreo) a 1,59 $g\ cm^{-3}$, pero incrementándose significativamente a 1,67 $g\ cm^{-3}$ al final de la evaluación ($p=0,015$) (Cuadro 2). Los resultados indican que la disminución en la densidad por efecto del subsolado no fue permanente y se incrementó por encima del testigo sin laboreo. La dap 5-10 cm disminuyó en forma significativa por

el efecto del laboreo 4% desde el inicio de la evaluación, desde 1,79 a 1,72 $g\ cm^{-3}$ ($p=0,013$). No se detectaron diferencias significativas en la densidad hasta los 10 cm asociados con la adición de yeso. Tampoco se observaron diferencias entre los tratamientos de laboreo para la dap 10-20 cm ($p=0,377$) y dap 20-30 cm ($p=0,774$). Los valores de dap 10-20 cm fueron 1,76 (sin laboreo) y 1,75 (con laboreo) $g\ cm^{-3}$; mientras que los de dap 20-30 cm fueron 1,75 $g\ cm^{-3}$ en ambos tratamientos. Por lo tanto, los valores de densidad

Cuadro 2. Densidad aparente entre 0 y 5 cm (dap 0-5) y densidad relativa 0-5 (DR) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Table 2. Bulk density between 0 and 5 cm (dap 0-5) and relativity compaction 0-5 (DR) for two years (2016-2017) under the effects of deep tillage (SL: without tillage and CL: with tillage).

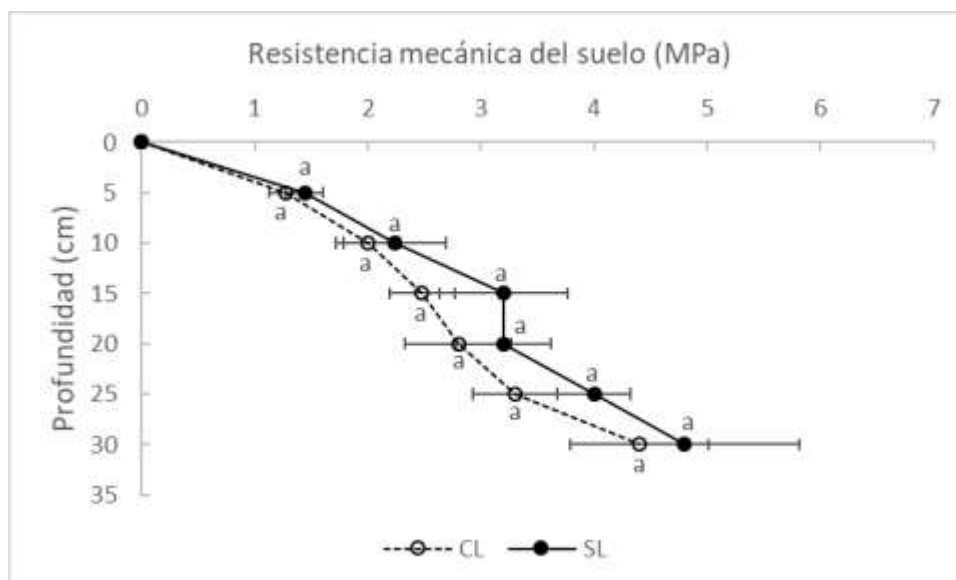
	Laboreo	julio 2016	noviembre 2017
dap 0-5 (gr cm ⁻³)	SL	1,64±0,04 Ba	1,62±0,04 Ba
	CL	1,59±0,04 Aa	1,67±0,04 Ab
DR 0-5 (%)	SL	82,0±1,7Ba	81±1,3Aa
	CL	79,0±1,7Aa	83±1,3Ab

Letras mayúsculas distintas para cada fecha y letras minúsculas distintas para cada laboreo, indican diferencias significativas (p<0,05) Para cada variable. Los valores son media ± 1 error estándar.

aparente del suelo observado no fueron óptimos para el crecimiento de las raíces de alfalfa desde el inicio del experimento: el subsolado no fragmentó el suelo en profundidad ni modificó la macroporosidad presente en el suelo previa a la instalación de los tratamientos.

La densidad máxima del suelo puede ser usada como un valor de referencia para evaluar el estado de compactación de los suelos, siendo para el suelo analizado igual a 2 g cm⁻³. La relación entre la densidad aparente y la densidad máxima alcanzable se denomina densidad relativa (DR). El laboreo profundo permitió reducir inicialmente la DR 0-5 cm desde 82 a 79%, tendiendo a un estado estacionario al final de la evaluación con valores entre 81 y 83% (Cuadro 2). La DR 5-10 cm se redujo en forma significativa desde 90% en el testigo sin laboreo, a 85% en los tratamientos con laboreo. La presencia de valores cercanos a 90% indica que el suelo

se encuentra muy cerca de la máxima compactación, con una severa disminución de los poros de mayor tamaño y niveles de densidad relativa asociados a la presencia de capas de suelo compactadas. La compactación afecta el desarrollo de las raíces al aumentar la resistencia mecánica del suelo, la que se determinó cada 5 cm hasta los 30 cm de profundidad (Figura 2), sin observar diferencias significativas entre los tratamientos de laboreo, en ninguna de las profundidades evaluadas: 5cm (p=0,477), 10 cm (p=0,732), 15 cm (p=0,334), 20 cm (p=0,635), 25 cm (p=0,543) y 30 cm (p=0,478). Los tratamientos no generaron valores óptimos de resistencia mecánica del suelo, aumentó a medida que se incrementa la profundidad y se observó que el valor de 2 MPa, que limita el crecimiento de las raíces, fue alcanzado a partir de los 10 cm de profundidad.



Letras minúsculas distintas para cada profundidad indican diferencias estadísticas significativas (p<0,05). Los valores son media ± error estándar.

Figura 2. Resistencia mecánica del suelo durante el año 2017 bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Figure 2. Soil strength (MPa) for 2017 under the effects of deep tillage (SL: without tillage and CL: with tillage).

La estabilidad de los agregados del suelo (EAS) fue mayor al final del experimento ($p=0,024$) y no presentó diferencias significativas por efecto del laboreo (Cuadro 3). La técnica de los microtamices permite determinar la estabilidad de los agregados mayores de 250 μm , que son los responsables de la estructura estable del suelo. Los valores obtenidos reflejan el deterioro de la calidad física del suelo y baja resiliencia. El contenido de materia orgánica fue adecuado durante todo el periodo evaluado; y el subsolado no modificó inicialmente el contenido de materia orgánica, pero generó una disminución del 12% al final del ensayo ($p=0,029$) (Cuadro 4). Para analizar la relación de la materia orgánica con la agregación del suelo, se utilizó el índice de materia orgánica (IMO). Los valores de IMO, al inicio de la evaluación, se ubicaron entre 3,6 y 3,7 en los tratamientos

con y sin laboreo. Al final de la evaluación aumentó a 4,2 en el tratamiento sin laboreo; manteniéndose en 3,6 en el tratamiento con laboreo.

No se observaron diferencias significativas en el pH en ninguna de las dos fechas evaluadas ($p=0,854$): el 25/07/16 fue igual a 6,97, mientras que el 17/11/17 fue igual a 7,19. Las diferencias del pH entre fechas ($p<0,0001$) no estuvieron asociadas a los tratamientos de laboreo ni a la adición de yeso. La conductividad eléctrica fue igual ($p=0,75$) en cada fecha evaluada: 0,1 mmhos cm^{-1} el 25/07/16 y 0,15 mmhos cm^{-1} el 17/11/17. Tanto los valores de pH como de conductividad eléctrica durante el periodo evaluado se ubicaron en el segmento superior del rango óptimo para el cultivo de alfalfa.

Cuadro 3. Cambios en estabilidad de los agregados del suelo (EAS) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Table 3. Changes of stability soil aggregates EAS for two years (2016-2017) under the effects of deep tillage (SL: without tillage and CL: with tillage).

Laboreo	EAS (%)	
	julio 2016	noviembre 2017
SL	26,20 \pm 0,09 Ab	36,53 \pm 0,09 Aa
CL	28,8 \pm 0,09 Ab	34,4 \pm 0,09 Aa

Letras mayúsculas distintas para cada fecha y letras minúsculas distintas para cada laboreo, indican diferencias significativas ($p<0,05$). Los valores son media \pm error estándar.

Cuadro 4. Cambios en la materia orgánica del suelo (MO) durante dos años (2016-2017) bajo los efectos de laboreo profundo (SL: sin laboreo y CL: con laboreo).

Table 4. Change of organic matter (MO) for two years (2016-2017) under the effects of deep tillage (SL: without tillage and CL: with tillage).

Laboreo	MO (g kg^{-1})	
	julio 2016	noviembre 2017
SL	22,4 \pm 0,6 Ab	25,6 \pm 0,6 Aa
CL	21,8 \pm 0,6 Aa	22,5 \pm 0,6 Ba

Letras mayúsculas distintas para cada fecha y letras minúsculas distintas para cada laboreo, indican diferencias significativas ($p<0,05$). Los valores son media \pm error estándar.

Discusión

En relación a la hipótesis planteada, el uso conjunto de un descompactador con timones angulados y la adición de yeso no incrementó la producción de forraje de la pastura y no mejoró la condición física del suelo. La producción de materia seca de la pastura registró diferencias significativas solamente en una de las fechas evaluadas (julio 2016), las que pudieron estar asociadas a cambios en el sistema radicular producidos por la descompactación. Sin embargo, en todos los cortes restantes, la producción de forraje fue igual en todas las combinaciones de laboreo y yeso.

La densidad inicial de plantas de la pastura se ubicó entre 13 y 20 plantas m^{-2} (julio 2016), sin diferencias significativas en ninguna de las combinaciones de laboreo y yeso. Se detectaron diferencias significativas al final de la evaluación (noviembre 2017), la combinación de laboreo profundo con adición de 200 kg ha^{-1} yeso pudo mantener la densidad de plantas del testigo al final del periodo evaluado. Sin embargo,

esta mejora en la densidad de plantas no se reflejó en modificaciones en la producción de forraje de la pastura. Se postula que la ausencia de respuesta de los tratamientos sobre la producción de forraje estaría asociada a la cantidad inicial de plantas, fue menor al umbral de 30 plantas m^{-2} la que afectaría la producción de forraje (Palmer y Wynn-Williams, 1976; Romero et al., 2006) y limitaría la expresión de los tratamientos. Tickes (1992) no observó efecto del laboreo sobre la producción de alfalfa, en suelos francos de Arizona; mientras que Frost (1988) reportó que el laboreo sobre suelos francos redujo en forma significativa la producción de raigrás perenne. Ambos autores mencionan que la ausencia de efecto del laboreo, se debería a la compactación del suelo, previa al laboreo.

La densidad aparente del suelo puede caracterizar las posibles restricciones al crecimiento radical (Jones, 1983). El suelo analizado (arena=38%, limo=45%, arcilla=17%) tiene

un umbral crítico de densidad aparente para el crecimiento de las raíces que se ubica entre 1,45 y 1,55 g cm⁻³ según Daddow y Warrington (1983) o entre 1,40 y 1,45 g cm⁻³ según Pilatti y de Orellana (2016). Los valores de densidad superaron el umbral propuesto por ambos modelos. Por debajo de los 5 cm de profundidad la densidad relativa, fue igual a 90%, indicando que el suelo se encuentra compactado, muy cercano a la densidad máxima y con serias restricciones físicas. El subsolado no modificó la compactación generada por el uso anterior del suelo. A su vez, la compactación se reflejó en el aumento de la resistencia mecánica del suelo. Con valores de resistencia a la penetración superiores a 2 MPa se reduce significativamente el crecimiento de las raíces y el abastecimiento de agua y nutrientes. Se observó que por debajo de los 10 cm de profundidad el suelo se opone a la deformación que ejercen las raíces en su crecimiento.

La EAS cuantifica los agregados mayores de 250 µm que son los responsables de la estructura estable del suelo y refleja el deterioro de la calidad física del suelo y una baja resiliencia, para recuperar su estructura original. Los niveles de EAS observados muestran que los agregados tienden a fragmentarse en agregados de menor tamaño. Pulido Moncada et al. (2009) observaron una relación lineal entre la estabilidad de los agregados y el contenido de materia orgánica. La materia orgánica aumenta las fuerzas de cohesión entre las partículas de suelo y hace a los suelos más resistentes a la compactación. Un nivel particular de materia orgánica puede resultar variable, dependiendo de la textura del suelo (Álvarez et al., 2006). El Índice de la Materia Orgánica (IMO) (Quiroga et al., 2006) permite incorporar la granulometría del suelo en el análisis de la materia orgánica y resultó ser un indicador más sensible que la materia orgánica como valor absoluto (Vankeirsbilck et al., 2015). Un valor de IMO igual a 5 es considerado el umbral entre suelos severamente degradados y suelos con distinto grado de riesgo (Vankeirsbilck et al., 2015). En este ensayo los valores de IMO se ubicaron por debajo de 4,2 lo que podría afectar la dinámica del agua, aire y de nutrientes (Quiroga et al., 2006), haciendo al suelo más susceptible a la compactación. Los suelos que contienen una distribución heterogénea de partículas tienen un mayor potencial de compactación. Al fragmentarse los agregados, las partículas más pequeñas pueden llenar los poros y aumentar la densidad del suelo.

Cabe entonces preguntarse, frente a un aumento de la resistencia a la penetración de las raíces, de qué medios se dispone para lograr mejoras en la estabilidad de los agregados en suelos francos, con baja cantidad de materia orgánica en relación a las partículas finas. Una de las vías probables es la creación de bioporos originados en canales de raíces. El sistema radicular de las gramíneas podría aumentar la macroporosidad y entrelazar las partículas de suelo (Barthes y Roose, 2002). Taboada et al. (2004) encontraron mayor número de agregados de mayor tamaño y más estables cuando se combinaban ciclos de humedecimiento-secado con la presencia de raíces de

gramíneas forrajeras. El presente trabajo aporta información novedosa acerca de los indicadores físicos de suelo en pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma, los cuales no mejoraron haciendo uso del laboreo profundo con subsolador o aplicación de yeso. La distribución del tamaño de partículas y el contenido de materia orgánica generan agregados pocos estables, haciendo a estos suelos susceptibles a la compactación. En futuros estudios se debería analizar el efecto de la adición de fósforo sobre la producción de la pastura y su relación con el pH y la conductividad eléctrica.

Conclusiones

El efecto conjunto del laboreo profundo y aplicación de yeso en alta dosis (200 kg ha⁻¹) generó una mayor densidad de plantas de alfalfa en pasturas del Valle de Lerma, pero sin reflejarse en una mayor producción de forraje. Con una población menor al umbral de 30 plantas m⁻² habría ausencia en la respuesta de producción de forraje. En relación a los parámetros del suelo, los valores de densidad aparente fueron superiores al umbral de densidad crítica hasta los 30 cm de profundidad. La resistencia mecánica del suelo alcanzó valores superiores a 2 MPa que limitarían el crecimiento de las raíces a partir de los 10 cm de profundidad. La adición de yeso no estabilizó las partículas finas, no modificó el pH y la conductividad eléctrica, ubicándose en el rango superior para este cultivo. De acuerdo al coeficiente de uniformidad, la distribución del tamaño de partículas y el limo fino (2 – 20 µm), el suelo analizado es no uniforme, inestable con tendencia a la reorganización y susceptible a la compactación. La cantidad de materia orgánica no sería suficiente para regenerar la estructura del suelo y formaría agregados poco estables. El suelo presentó restricciones físicas que no fueron solucionadas con el laboreo profundo y la aplicación de yeso. Persiste la necesidad de información acerca de la forma de incrementar el rendimiento de las pasturas de alfalfa en el Valle de Lerma, en particular, estrategias de manejo que favorezcan la persistencia de la pastura como la aplicación de fertilización fosforada y/o la incorporación de gramíneas forrajeras.

Agradecimientos

A los directivos, personal técnico y de apoyo de la EEA Salta - INTA Cerrillos por facilitar los medios para desarrollar este trabajo. A los alumnos de la Universidad Nacional de Salta que colaboraron con el muestreo del suelo y la pastura.

Bibliografía

- ALVAREZ, C.R., TABOADA, M.A., BUSTINGORRI, C. y GUTIÉRREZ BOEM, F.H. 2006. Descompactación de suelos en siembra directa: efectos sobre las propiedades físicas y el cultivo de maíz. *Ciencia del Suelo* 24(1): 1-10.
- ARIAS, M. y BIANCHI, A.R. 1996. Estadísticas climatológicas de la Provincia de Salta. Salta, Argentina. GPS-INTA. 189 p.

- BALZARINI, M.G., GONZALEZ, L.A., TABLADA, E.M., CASANOVES, F., Di RIENZO, J.A., y ROBLEDO, C.W. 2008. InfoStat software estadístico. Manual del usuario. Córdoba, Argentina. Brujas, Córdoba. 216 p.
- BARTHES, B. and ROOSE, E. 2002. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels. *Catena* 47(2): 133-149.
- BOUTON, J.H. 2012. Breeding lucerne for persistence. *Crop and Pasture Science* 63(2): 95-106.
- CANEVARI, M. and PUTNAD, D.H. 2007. Managing depleted alfalfa stands: overseeding and other options. Oakland, California, EEUU: University of California. 14 p.
- CARUSO, H., GIECO, J., HUIDOBRO, D., PEREZ, C., MONETA, D., ALONSO, N., BELTRAN, M., ESCUDERO, J. y LOPEZ, E. 2018. Población de alfalfa en suelo franco arenoso. *Revista Argentina de Producción Animal* 38(1): 238.
- CORVALÁN, E.R., FRANZONI, A., HUIDOBRO, D. y ARZENO, J.L. 2000. Método de microtamices para la determinación de la estabilidad de los agregados del suelo entre 1 y 2 mm. XIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Argentina. pp. 35-39.
- DADDOW, R.L. and WARRINGTON, G.E. 1983. Growth-limiting soil bulk densities as influenced by soil texture. Colorado, EEUU. USDA Forest Service. 17 p.
- FROST, J.P. 1988. Effects on crop yields of machinery traffic and soil loosening, Part 1. Effects on grass yield of traffic frequency and date of loosening. *J. Agric. Engng Res.* 39: 301-312.
- GEE, G.W. and BAUDER, J.W. 1986. Particle-size analysis. In: *Methods of Soil Analysis, Part 1. Physical and Mineralogical Methods.*, Agronomy Monograph. Madison. Wisconsin. USA: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. pp. 383-411.
- HAKANSSON, I. and 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: 71-85.
- JONES, C.A. 1983. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Science Society of America Journal* 47: 1208-1211.
- KLOSTER, N.S., AZCARATE, M.P., BABINEC, F.J. y BONO, A. 2008. Comparación de técnicas de medición del ph del suelo: ph en pasta de saturación y en relación suelo:agua 1:2,5. XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. San Luis, Argentina. 6 p.
- MARCOLIN, C.D. y KLEIN, V.A. 2011. Determinacao da densidade relativa do solo por uma funcao de pedotransferencia para a densidade do solo máxima. *Acta Scientiarum Agronomy* 33(2): 349-54.
- MATTERA, J., ROMERO, L.A., CUATRÍN, A.L., CORNAGLIA, P.S. and GRIMOLDI, A.A. 2013. Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (*Medicago sativa* L.) in response to row spacing. *Europ. J. Agronomy* 45: 87-95.
- MBONIMPA, M., AUBERTIN, M., CHAPUIS, R.P. and BUSSIERE, B. 2002. Practical pedotransfer functions for estimating the saturated hydraulic conductivity. *Geotechnical and Geological Engineering*. pp. 235-59.
- MICUCCI, C.A. y MENARDI, R.L. 2004. Propuesta tentativa para un sacamuestra dinámico de uso extendido (S.U.E.). Pp. 17-28. En: Filgueira R.R. y Micucci F.G. (eds). *Metodologías Físicas para la investigación del Suelo: penetrometría e infiltrometría*. Buenos Aires, Argentina. Editorial Universidad Nacional de la Plata. 180 p.
- MORO, E.C., VENIALGO, C.A., GUTIERREZ, N.C., DRGANC, D., ASSELBORN, A. y OLESZCZUK, J.D. 2004. Efecto de las labranzas y rotaciones sobre la compactación de suelos en distintos sistemas productivos de la Provincia del Chaco-República Argentina. *Agrotecnia* 12: 3-8.
- NELSON, D.W. and SOMMERS, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: *Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods.*, Agronomy. Madison. Wisconsin. USA: SSSA. pp. 961-1010.
- ORTEGA, A. y CORVALÁN, E. 2001. Diagnóstico de suelos. Salta, Argentina. INTA. EEA Salta. 5 p.
- PALMER, T.P. and WYNN-WILLIAMS, R.B. 1976. Relationships between density and yield of lucerne. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture* 4(1): 71-77.
- PEREYRA, S., CARUSO, H. y MIRANDA, S. 2011. Relación entre la compactación del suelo y la producción de forraje de alfalfa. Comunicación. *Revista Argentina de Producción Animal*. 3(1): 507.
- PILATTI, M.A. y de ORELLANA, J.A. 2016. Hacia una clínica de suelos. Mirando el suelo con ojos de planta. Universidad Nacional del Litoral. 280 p.
- PULIDO MONCADA, M.A., LOBO, D. y LOZANO, Z. 2009. Asociación entre indicadores de estabilidad estructural y la materia orgánica en suelos agrícolas de Venezuela. *Agrociencia* 43(3): 221-230.
- QUIROGA, A., FUNARO, D., NOELLEMEYER, E. and PEINEMANN, N. 2006. Barley yield response to soil organic matter and texture in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 90(1-2): 63-68.
- ROMERO, L.A., MATTERA, J. y CUATRÍN, A. 2006. Efecto de la distancia y la densidad de siembra sobre la producción de materia seca y la persistencia de la alfalfa. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias* 26: 171-72.
- TABOADA, M., BARBOSA, O.A., RODRÍGUEZ, M.B. and COSENTINO, D.J. 2004. Mechanisms of aggregation in a silty loam under different simulated management regimes. *Geoderma* 123: 233-244.
- TICKES, B. 1992. Renovation alfalfa. Forage and grain. College of Agriculture Report. pp. 6-7.
- USDA. 1999. Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo. USDA, EEUU. 82 p.
- VANKEIRSBILCK, M.I., BARRACO, M. y MAEKAWA, M. 2015. Materia orgánica y textura en suelos de sistemas lecheros de la cuenca oeste de la provincia de Buenos Aires. Memoria técnica. EEA General Villegas. 2014-2015. pp. 57-59.
- VARGAS GIL, J. 1990. Provincia de Salta. Escala 1:500000. Atlas de suelos de la República Argentina, Proyecto PNUD ARG/85/019. Buenos Aires, Argentina. INTA. pp. 287-350.