

EFFECTO DEL PISOTEO ANIMAL SOBRE LAS PROPIEDADES DE UN SUELO. PARTE I: DENSIDAD APARENTE, HUMEDAD, RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN, Y MODELOS ASOCIADOS

EFFECT OF ANIMAL TRAMPLING ON THE PROPERTIES OF A SOIL. PART I: BULK DENSITY, MOISTURE, PENETRATION RESISTANCE, AND ASSOCIATED MODELS

Daniel Martínez¹, Ana Landini¹, Eduardo Soza^{2*}, Olga S. Heredia³, Claudia Sainato¹

¹Cátedra de Física; ²Cátedra de Maquinaria Agrícola; ³Cátedra de Edafología
 Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453 C1417DSE, Buenos Aires, Argentina. * Autor para correspondencia. E-mail: esoza@agro.uba.ar

RESUMEN

La intensificación de la producción ganadera conduce a incrementar el pisoteo del suelo, efecto que no ha sido estudiado exhaustivamente. Los objetivos de este estudio fueron: 1) Comparar la densidad aparente (DA) a dos profundidades para cuatro niveles de intensidad de pisoteo (Ip); 2) Comparar, dentro del mismo rango de humedad y a dos profundidades, la resistencia mecánica (Rp) del suelo para cuatro niveles de Ip ; 3) Estudiar la dependencia Rp con la DA y la humedad gravimétrica (H) para cuatro niveles de Ip con los modelos de Busscher y de Ayers. El estudio se realizó en un establecimiento de producción animal ubicado en la provincia de Buenos Aires, Argentina, en una llanura con pradera implantada de leguminosas y gramíneas. Ciertos sectores se destinaban a pastoreo directo y otros a corte mecánico sin pisoteo animal. Se midieron DA , H y Rp para cuatro niveles de Ip : nula (A), media (B), alta (C), y muy alta (D). Se determinó la textura y el carbono total (CT) del suelo. Se encontró el menor valor de DA ($0,98 \text{ g cm}^{-3}$) en el grupo D entre 0 y 10 cm, atribuido al gran contenido de CT (682 g kg^{-1}). El grupo A presentó el valor de Rp más bajo, entre 0 y 10 cm ($4,41 \text{ MPa}$). Se concluyó que la Rp resultó ser un buen indicador de la Ip en la profundidad de 0 a 10 cm, no así la DA . Los modelos que relacionan Rp con H y DA no serían aplicables a suelos en donde los contenidos de CT son altos y existe pérdida de estructura por amasado.

Palabras clave: pisoteo animal, penetrómetro dinámico, modelo de Busscher, modelo de Ayers.

ABSTRACT

The intensification of animal production leads to increased soil trampling, which is an effect that has not been studied extensively. The objectives of this study were: 1) To compare the bulk density (DA) at two different depths for four levels of trampling intensity (Ip); 2) To compare the mechanical strength (Rp) of the soil, in the same range of soil moisture and at two different depths for four levels of Ip ; 3) To study the dependence of Rp with DA , and the gravimetric moisture (H) for four levels of Ip using the models proposed by Busscher and by Ayers. The study was carried out in an animal production facility located in the province of Buenos Aires, Argentina, on a plain with planted legume and grass pastures. Certain sectors were used for grazing and other sectors for mechanical cutting without trampling. DA , H and Rp were measured for four Ip levels: zero (A), medium (B), high (C) and very high (D). Texture and total carbon (CT) of the soil were determined. It was found the lowest value of DA (0.98 g cm^{-3}) in group D between 0 and 10 cm, attributed to its high content of CT (682 g kg^{-1}). Group

Recibido: 20 mayo 2010. Aceptado: 4 noviembre 2010.

A had the lowest R_p value between 0 and 10 cm (4.41 MPa). It was concluded that, unlike DA , R_p was a good indicator of the I_p in the depths from 0-10 cm. Models that relate R_p with H and DA would not apply to soils where the content of CT is high and there is loss of structure by poaching.

Key words: cattle trampling, dynamic penetrometer, Busscher model, Ayers model.

INTRODUCCION

En los últimos años el sector agropecuario argentino ha presentado cambios profundos en los sistemas productivos, entre ellos un incremento notable de la superficie destinada a la producción agrícola (Soza et al., 2005) en detrimento de las actividades ganaderas. Por ello, la degradación y deterioro de las propiedades físicas y químicas de los suelos como resultado del uso agrícola, está presente en prácticamente la totalidad de las tierras agrícolas bajo cultivo (Botta et al., 2005). Respecto a la actividad pecuaria, el productor opta por intensificar en mayor medida la producción de carne con encierre y suplementación, o confinar la ganadería hacia suelos solo con aptitud ganadera, con el consiguiente aumento de la carga animal acompañada por un incremento del pisoteo.

Estos nuevos planteos productivos conllevan algunas cuestiones fundamentales no exhaustivamente estudiadas, tal como el mencionado efecto del pisoteo de los animales sobre las propiedades físicas del suelo.

Trein y Levien (2001) encontraron al analizar el efecto del pisoteo vacuno en tres profundidades de suelo, que éste afectó la densidad aparente y la porosidad total hasta los 7,5 cm y detectaron presencia de compactación hasta los 15 cm. Zamora et al. (2006) concluyeron que el pastoreo en siembra directa presentó bajo impacto sobre la concentración de nitratos, humedad del suelo y densidad aparente, pero mostró un incremento de la dureza en los primeros centímetros del perfil del suelo, detectados a través de la resistencia a la penetración, atribuyendo esto a la menor humedad y no al aumento de la densidad aparente.

Taboada y Lavado (1993) encontraron que el pisoteo animal provocó el colapso de poros mayores de 60 μm y la disminución de los agregados estables al agua en suelos secos. Taboada y Micucci (2002) afirman que los suelos sometidos a pisoteo animal presentan menor aireación e infiltración. Resultados dispares reportan Donkor et al. (2002), quienes hallaron el mismo grado de compactación de suelo con pocos animales pastoreando por un período largo, o muchos en un período más breve. Además, concluyen que el pastoreo por breves períodos no mostró ninguna ventaja respecto al pastoreo continuo sobre las propiedades físicas del suelo.

Existen varios modelos que relacionan la resistencia a la penetración (R_p) con propiedades físicas

caso como la densidad aparente (DA), la humedad gravimétrica (H) y la tensión mátrica.

Entre los modelos de dos variables independientes (DA y H) se encuentran el propuesto por Busscher y Sojka (1987) de tres parámetros, y el de Ayers y Perumpral (1982 citado en Busscher, 1990) de cuatro parámetros.

Las expresiones de estos modelos son, respectivamente:

$$R_p = R_{p_0}(DA)^\alpha H^\beta \quad (1) \text{ (Modelo de Busscher)}$$

$$R_p = \frac{R_{p_0}(DA)^\alpha}{\beta + (H - \gamma)^2} \quad (2) \text{ (Modelo de Ayers)}$$

donde R_{p_0} , α , β y γ son parámetros de ajuste a determinar.

En Argentina se encontró sólo una publicación en donde se haga uso de modelos que relacionen la R_p con la DA y la H como el de Busscher y el de Ayers (Paredes et al., 2009). De manera que es de interés analizar el grado de ajuste de estos modelos para suelos con y sin pisoteo animal, así también como comparar los resultados obtenidos con otros modelos con las mismas variables, no hallados en la literatura.

La hipótesis propuesta fue que la intensidad de pisoteo generada por distinta carga animal, afecta a la densidad aparente y a la resistencia del suelo a la penetración.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) Comparar los valores de densidad aparente del suelo a dos profundidades, para cuatro niveles de intensidad de pisoteo; 2) Comparar, dentro del mismo rango de humedad y a dos profundidades, los valores de la resistencia mecánica del suelo a la penetración para cuatro niveles de intensidad de pisoteo; y 3) Estudiar la dependencia de la resistencia mecánica del suelo con la densidad aparente, y la humedad gravimétrica para cuatro intensidades de pisoteo y dos profundidades, con 13 modelos entre los cuales se encuentran el de Busscher y el de Ayers.

MATERIALES Y METODOS

Descripción del sitio experimental

El trabajo se realizó en un establecimiento agropecuario situado en la localidad de Marcos Paz, Provincia de Buenos Aires, Argentina (34°52' S; 58°45' O, 25 msnm), cuya actividad principal es

la cría y engorde intensivo de ganado vacuno. Dicha actividad comprende el pastoreo a campo, la producción de forraje con cosecha mecánica y la suplementación a corral.

El mismo se encuentra ubicado en una llanura con una pastura polifítica de leguminosas y gramíneas implantadas. En la misma se hallaron las siguientes especies: alfalfa (*Medicago sativa*), lotus (*Lotus corniculatus*), trébol rojo (*Trifolium pratense*), trébol blanco (*Trifolium repens*), cebadilla

(*Bromus unioloides*), raigrass (*Lolium multiflorum*) y pasto ovilla (*Dactylis glomerata*).

De acuerdo al manejo del establecimiento ciertos sectores se destinaban a pastoreo directo y otros a la producción de forraje sin pisoteo animal. Los muestreos se llevaron a cabo durante el período 2007-2009, en las cuatro estaciones del año.

Durante este período existieron años muy lluviosos como el 2007 y 2009, y otro de escasas precipitaciones como el 2008 (Tabla 1).

Tabla 1. Precipitaciones por mes y año. 2007-2009.
Table 1. Precipitation per month and year. 2007-2009.

Año	Precipitaciones, mm												Anual
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	
2007	51,8	169,0	249,6	113,7	32,7	42,4	10,3	39,3	108,3	195,3	63,1	55,2	1130,7
2008	144,0	183,0	122,2	25,7	23,6	46,6	13,3	16,3	12,9	84,1	74,6	42,7	789,0
2009	14,9	124,6	95,0	34,2	27,2	18,8	102,9	27,7	110,0	163,5	138,4	175,1	1032,3

Fuente: Estación Ezeiza, Servicio Meteorológico Nacional, Argentina.

Características del suelo

Se realizaron dos calicatas de 1 m de profundidad. Una de ellas se localizó en un potrero con pastura sin presencia de animales (Fig. 1, Sector A1). La otra se ubicó a unos 400 m de la anterior, en un potrero destinado al pastoreo (Fig. 1, Sector

B2). En la Fig. 1 se puede observar un croquis de la ubicación relativa de cada uno de los sectores en donde se llevaron a cabo las mediciones. En algunos casos el sector corresponde a una parcela completa, en otros una fracción de la parcela, en cuyo caso se indica en línea punteada.

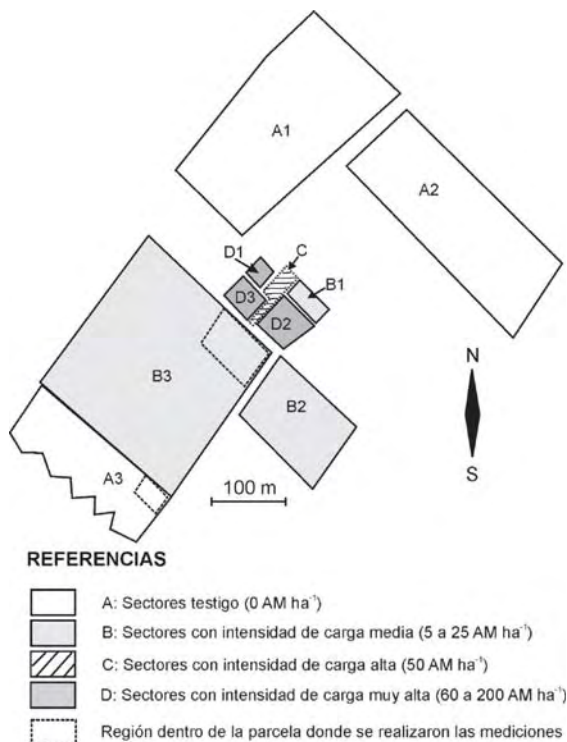


Fig. 1. Croquis de la ubicación relativa de cada uno de los sectores.
Fig. 1. Layout showing location of each sector.

Se realizó un reconocimiento edafológico de rutina de los horizontes y se tomaron muestras de cada uno de ellos para la determinación de la textura y de los compuestos químicos más comunes. Estos análisis permitieron clasificar los suelos como dos Argiudoles que diferían a nivel de suborden.

Diseño experimental

Se seleccionaron 4 grupos de sectores (A, B, C y D) (Fig. 1) siguiendo un diseño experimental factorial dirigido. Tres de los grupos estaban formados por 3 sectores cada uno y el grupo restante por un único sector, ya que no se hallaron dentro del establecimiento condiciones edáficas y de manejo similares para considerar repeticiones en este cuarto grupo C. Cada grupo se caracterizó por distinta intensidad de pisoteo o carga animal (tratamientos). Ésta se cuantificó en base a la superficie de los sectores, el número de animales presentes y el tiempo de permanencia en ellos. Los resultados se expresaron en AM ha⁻¹ (Animales por mes y unidad de hectárea), es decir la cantidad de animales que estimativamente se encontraban durante un mes por cada hectárea dentro del sector. Los animales vacunos tenían una masa promedio de 200 kg.

A continuación se describen las características de cada grupo y sectores que los constituyen:

Grupo A (testigo): sectores con intensidad de carga nula (0 AM ha⁻¹)

A1: una parcela de 3 ha, con pastura polifítica sembrada hace 13 años, sin presencia de animales, ubicada a 400 m de los corrales de encierre (D1, D2, D3) y en situación topográfica más baja que estos últimos; A2: una parcela de 3 ha con pastura polifítica de 13 años sin presencia de animales; A3: un sector de 900 m² perteneciente a una parcela de 5 ha ubicada 800 m al sur de los corrales de encierre, también con pastura de las mismas características que A1 y A2 y en situación topográfica más alta que los corrales.

Grupo B: sectores con intensidad de carga media (5 a 25 AM ha⁻¹)

B1: una parcela de 0,25 ha aledaña a un corral de encierre (D2); B2: un sector de 0,5 ha perteneciente a una parcela de 1,6 ha de pastura; B3: un sector de 0,5 ha perteneciente a una parcela de 3 ha de pastura.

Grupo C: sector con intensidad de carga alta (50 AM ha⁻¹)

Este sector es una franja de 200 m² contigua a una zanja de efluentes con una circulación diaria de animales y tránsito semanal de maquinaria. La pastura en esta franja, de las mismas características de los sectores anteriores, era muy mala debido al tránsito.

Grupo D: sectores con intensidad de carga muy alta (60 a 200 AM ha⁻¹)

Los sectores de estos grupos corresponden a tres corrales de encierre de uso rotativo cada quince o treinta días. El suelo fue alterado antrópicamente con incorporación de tosca, encontrándose los tres corrales próximos a la zanja de efluentes, o sea cercanos al sector C. Las superficies de estos corrales eran: D1: 800 m²; D2: 2000 m²; D3: 1300 m².

Se consideró un experimento factorial de dos factores con cuatro y dos niveles, respectivamente, que se mencionan a continuación: Factor 1: Intensidad de pisoteo con niveles A, B, C y D descriptos anteriormente; Factor 2: Profundidad de muestreo con dos niveles: 0 a 10 cm y 10 a 20 cm.

Determinaciones experimentales

En cada sector se seleccionaron sitios siguiendo un diseño al azar, en donde se realizaron las mediciones de resistencia a la penetración (*R_p*). En cada sitio se extrajeron tres muestras entre 0 y 10 cm, y tres entre 10 y 20 cm de profundidad, para la determinación de la humedad gravimétrica (*H*) y la densidad aparente (*DA*). Los valores de cada sitio y profundidad fueron posteriormente promediados. Se analizaron 21 sitios en el grupo A, 22 en el B, 6 en el C, y 13 en el D.

La resistencia a la penetración del suelo se midió con un penetrómetro dinámico o de impacto de punta cónica de 30° y una pesa de 1,5 kg (Herrick y Jones, 2002; Vanags, 2004). Se realizaron 10 determinaciones en cada sitio, en cada una se dejó caer la pesa 10 a 12 veces, desde 1 m de altura, y registrando la profundidad de hincado en cada golpe. Los valores de *R_p* obtenidos para la profundidad de 0 a 10 cm y la de 10 a 20 cm fueron posteriormente promediados, para obtener un valor representativo para cada uno de estos niveles de profundidad.

La densidad aparente se midió con el método del cilindro de volumen conocido (Blake, 1965) y la humedad gravimétrica, por secado en estufa a 105 °C, hasta alcanzar peso constante.

En cada sector se tomaron también muestras compuestas formadas por tres submuestras para determinar los porcentajes de arena, limo y arcilla y el contenido de carbono oxidable (*C_{ox}*) por el método de Walkley-Black (Page, 1982)

Los análisis preliminares del contenido de carbono oxidable en el suelo mostraron que estos contenidos no diferían apreciablemente en las muestras extraídas de los sectores sin pisoteo de aquellas extraídas de los corrales de encierre, a pesar de evidenciarse una gran cantidad de materia orgánica sin descomponer proveniente de los excrementos de los animales en estos últimos.

Se decidió por lo tanto determinar en varios de

los sectores el contenido de carbono total (*CT*) del suelo, es decir la suma del contenido de carbono inorgánico (principalmente carbonatos) y el de carbono orgánico total (Skjemstad y Baldock, 2008). Se extrajo una muestra compuesta obtenida de tres submuestras en la profundidad de 0 a 20 cm en cada uno de los siguientes sectores: A1, A2, B1, C, D1 y D3. El contenido de *CT* se determinó por el método de combustión seca en horno a 500°C durante 5 horas (AOAC, 1980).

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de varianza con los resultados de *DA* como variable dependiente, y con la intensidad de pisoteo (Factor 1) y la profundidad (Factor 2) como variables de clasificación.

Se realizó también un análisis de varianza con los resultados de *Rp* como variable dependiente, y con la intensidad de pisoteo y la profundidad como variables de clasificación.

La resistencia a la penetración es fuertemente dependiente del contenido de humedad (Jorajuría Collazo, 2004), por este motivo para poder comparar los valores de *Rp* para distintas intensidades de pisoteo y profundidades, se seleccionó un intervalo de humedad para el cual se dispusiera de datos de todos los sectores. La humedad gravimétrica entre el 20% y 25% satisfizo esta condición. Cabe aclarar que las mediciones se realizaron durante el período 2007-2009, existiendo años con precipitaciones muy altas, como en el 2007, de allí que el rango completo de humedad gravimétrica del suelo en los sitios donde se llevaron a cabo las mediciones abarcó desde el 10% al 60%.

En todas las situaciones se analizó la posible interacción entre factores, y para verificar el cumplimiento de los supuestos del test de ANOVA fue necesario transformar los datos de *DA* en DA^3 , mientras que para los valores de *Rp* se empleó la

función logaritmo natural.

El supuesto de normalidad de los errores se testeó por medio de un gráfico Q-Q plot realizado con el programa InfoStat (2002), considerando que la distribución era normal cuando el coeficiente *r* era mayor a 0,95. El supuesto de homogeneidad de las varianzas se comprobó también en forma gráfica.

Sobre los datos transformados se empleó el test LSD de Fisher ($p \leq 0,05$) para la comparación de medias.

Posteriormente se realizó un análisis de regresión no lineal con el programa DataFit (2011) entre los valores experimentales de *Rp*, *DA* y *H* con la funciones de Busscher (Ec. 1) y la de Ayers (Ec. 2) Para este análisis se empleó el conjunto completo de valores de *H* y los correspondientes de valores de *DA* y *Rp*.

Se analizaron otras 11 relaciones funcionales de tres parámetros con las mismas variables independientes (Ver apéndice 1), con el objeto de comparar su bondad de ajuste (R^2) respecto de la función de Busscher. Estas relaciones forman parte de los modelos tridimensionales de tres parámetros predefinidos en el programa estadístico DataFit (2011).

RESULTADOS

Textura, carbono oxidable y carbono total

En la Tabla 2 pueden verse los resultados de los porcentajes de arena, limo, arcilla, carbono oxidable y carbono total para muestras de suelo tomadas entre 0 y 20 cm de profundidad. Se observa que el valor máximo de *Cox* se obtuvo en el grupo D (corrales de encierre) y que supera en un 87,5% los valores correspondientes a los grupos de intensidad de pisoteo nula (A), media (B) y alta (C). Los valores de *CT* del grupo D son 4 veces superiores a los otros grupos.

Tabla 2. Valores medios (%) de arena, limo y arcilla entre 0 y 20 cm de profundidad, correspondientes a los diferentes grupos, clase textural y contenidos de carbono oxidable (*Cox*) y carbono total (*CT*).
Table 2. Mean values (%) of sand, silt and clay between 0 and 20 cm deep, corresponding to different groups, textural class and contents of oxidizable carbon (*Cox*) and total carbon (*CT*).

Intensidad de carga	Arena	Limo	Arcilla	Clase textural	Cox ¹	CV%	CT ²
	%	%	%		g kg ⁻¹		g kg ⁻¹
A	21,9	50,6	27,5	Fr. limosa	21,9 (3)	43	48-56
B	30,0	51,0	19,0	Fr. limosa	18,1 (5)	24	52
C	17,5	57,5	25,0	Fr. arcillo limosa	21,2 (1)	0	66
D	22,5	52,5	25,0	Fr. limosa	37,5 (3)	21	198-682

¹ Entre paréntesis el número de muestras extraídas; ² Se indican los valores de cada una de las muestras medidas. Fr.: franco.

En la columna de los contenidos de *Cox*, se indican entre paréntesis el número de muestras extraídas y en la siguiente, el coeficiente de variación (CV%). En la columna de los contenidos de *CT*, se indican los valores de cada una de las muestras medidas.

Densidad aparente

En la Tabla 3 se muestran los resultados del test de Fisher ($p \leq 0,05$) para las medias de la *DA* para cada uno de los niveles de los factores (profundi-

dad e intensidad de pisoteo). El test realizado sobre datos transformados DA^3 mostró que existe interacción entre los dos factores.

Tabla 3. Valores medios de la densidad aparente (*DA*) (g cm^{-3}) para cada uno de los niveles de profundidad e intensidad de pisoteo.

Table 3. Mean values of bulk density (*DA*) for each of the levels of depth and intensity of trampling.

Profundidad (cm)	<i>DA</i>			
	A	B	C	D
0 a 10	1,21b (72)	1,18 b (82)	1,25 c (18)	0,98 a (39)
10 a 20	1,25 c (72)	1,23 bc (59)	1,31d (18)	1,24 bc (39)

Entre paréntesis se indica el número de muestras analizadas.

Letras distintas indican diferencias significativas según el test de LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

Se encontraron diferencias significativas al nivel $p \leq 0,05$ en los valores medios de la *DA* dentro de los grupos, salvo en el de intensidad media de pisoteo (B). Las densidades resultaron mayores entre 10 y 20 cm que en superficie.

Por otra parte, el menor valor de *DA* a nivel superficial (0 a 10 cm), correspondió al grupo D (muy alta intensidad de pisoteo), diferenciándose estadísticamente del resto de los valores tanto para los niveles de profundidad como los de intensidad de carga animal.

Resistencia mecánica a la penetración

En la Tabla 4 pueden verse los resultados del test de LSD Fisher ($p \leq 0,05$) para los valores medios de la *Rp* y contenidos de humedad gravimétrica entre el 20% y 25%. Los valores de *Rp* fueron previamente transformados por medio de la función $\ln(x)$. El resultado del test indicó que existe interacción entre los factores profundidad e intensidad de pisoteo.

Tabla 4. Valores medios de la resistencia a la penetración (*Rp*) para cada profundidad, con *H* (contenidos de humedad) dentro de rango 20-25 % para todos los grupos de sectores ensayados.

Table 4. Mean values of penetration resistance (*Rp*) for each depth, with *H* (moisture contents) ranging 20-25% for all sector groups tested.

Profundidad (cm)	<i>Rp</i> (MPa)			
	A	B	C	D
0 a 10	4,41 a (80)	6,06 c (60)	7,67 d (358)	6,80 c (150)
10 a 20	7,51 d (57)	4,67 ab (40)	6,71 c (129)	5,58 b (260)

Entre paréntesis se indica el número de mediciones realizadas.

Letras distintas en la fila o en la columna indican diferencias significativas según el test de LSD Fisher ($p \leq 0,05$).

El grupo testigo (A) presentó el valor medio de *Rp* más bajo para la profundidad de 0 y 10 cm (4,41 MPa), pero no diferenciándose del encontrado en grupo B para la profundidad de 10 a 20 cm (4,67 MPa). Los valores mayores de *Rp* se en-

contraron en el grupo de intensidad de pisoteo alta (C) entre 0 y 10 cm de profundidad (7,67 MPa) y en el grupo testigo (A) para la profundidad de 10 a 20 cm (7,51 MPa).

Para el grupo testigo (A) *Rp* resultó estadística-

mente menor en superficie que en profundidad, mientras que para en los grupos con pisoteo, la relación fue opuesta.

Funciones de regresión

En la Tabla 5 pueden verse los valores de los parámetros Rp_0 , α y β y el coeficiente de determinación R^2 obtenidos del ajuste de los datos experimentales con la ecuación (1) para cada intensidad de pisoteo y profundidad. Se puede observar que sólo presentó ajuste satisfactorio para el mo-

delo de Busscher en el grupo A de 10 a 20 cm de profundidad ($R^2 = 0,55$), en el B de 0 a 10 cm ($R^2 = 0,81$) y en el B de 10 a 20 cm ($R^2 = 0,73$). Sin embargo se hace notar que en estos dos últimos casos el coeficiente de la función arrojó un valor negativo, lo cual implica que la resistencia a la penetración disminuye con el aumento de la densidad en este grupo de sectores lo cual no tiene sentido físico.

Se destaca también el pobre ajuste de la función de Busscher para los grupos de alta y muy alta intensidad de pisoteo, así también como el valor negativo del coeficiente para el grupo D.

Tabla 5. Valores de los parámetros Rp_0 , α y β del modelo de Busscher, coeficiente de determinación R^2 y número de repeticiones obtenidos del ajuste de los datos experimentales con la ecuación (1).

Table 5. Parameter values Rp_0 , α and β for Busscher model, coefficient of determination R^2 and number of repetitions obtained from the experimental data fitted with Equation (1).

Int. de pisoteo	Prof. cm	Rp_0 (MPa)	α	β	R^2	n
A	0 a 10	23,6	0,97	-0,49	0,33	21
	10 a 20	9,65	4,00	-0,67	0,55	21
B	0 a 10	212,8	-0,73	-1,15	0,81	18
	10 a 20	304,2	-0,19	-1,33	0,73	18
C	0 a 10	5,35	1,10	0,05	0,10	6
	10 a 20	12,6	0,41	-0,22	0,06	6
D	0 a 10	36,6	-0,66	-0,49	0,11	13
	10 a 20	48,5	-1,28	-0,52	0,02	13

En la Tabla 6 se presentan los valores de los parámetros Rp_0 , α y β y γ y el coeficiente de determinación R^2 obtenidos del ajuste de los datos experimentales con la Ecuación (2) para cada intensidad de pisoteo y profundidad. Se puede ver que sólo los grupos A y C presentaron ajustes con significado físico para las dos profundidades, ya que el coeficiente debe ser positivo puesto que Rp debe incrementarse al aumentar DA. En estos grupos el

ajuste fue regular para el grupo A ($R^2 = 0,42$ y $0,55$), muy bueno para el grupo C en la profundidad de 0 a 10 cm ($R^2 = 0,89$) y deficiente para este último grupo en la profundidad de 10 a 20 cm ($R^2 = 0,16$).

El mejor comportamiento en cuanto al ajuste para los grupos A y C del modelo de Ayers respecto del de Busscher, se atribuye al mayor número de parámetros para ajustar que tiene el primero comparado con el segundo.

Tabla 6. Valores de los parámetros Rp_0 , α , β y γ del modelo de Ayers, coeficiente de determinación R^2 y número de repeticiones obtenidos del ajuste de los datos experimentales con la Ecuación (2).

Table 6. Parameter values Rp_0 , α , β and γ for Ayers model, coefficient of determination R^2 and number of repetitions obtained from the experimental data fitted with Equation (2).

Int. de pisoteo	Prof. cm	Rp_0 (MPa)	α	β	γ	R^2	n
A	0 a 10	1911	0,63	220	7,5	0,42	21
	10 a 20	5645	1,70	379	-8,5	0,55	21
B	0 a 10	2449	-0,32	136	4,1	0,85	18
	10 a 20	5290	-0,31	-133	-12	0,73	18
C	0 a 10	19,67	5,64	5,94	19	0,89	6
	10 a 20	207	0,96	34	19	0,16	6
D	0 a 10	812728	-0,57	-306729	-620	0,06	13
	10 a 20	7383	-2,03	629	24,6	0,06	13

En la Fig. 2 se presenta la representación gráfica de la ecuación (1) para los valores experimentales del grupo A entre 10 y 20 cm.

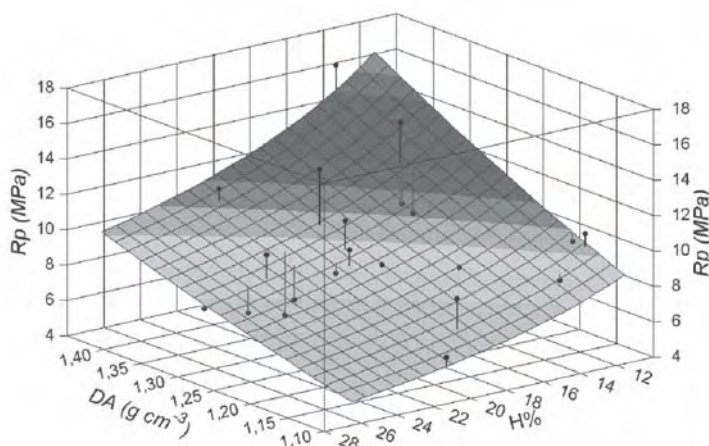


Fig. 2. Representación gráfica de los valores experimentales (R_p) (círculos) y de la Ecuación (1) (superficie), obtenida con los coeficientes de la Tabla 5 para el grupo A y una profundidad de 10 a 20 cm.

Fig. 2. Graphical representation of the experimental values (R_p) (circles) and the Equation (1) (surface), obtained with the coefficients of Table 5 for group A and a depth of 10 to 20 cm.

En la Tabla 7 pueden verse los valores máximo y mínimo del coeficiente R^2 obtenidos en los ajustes de los 11 modelos de tres parámetros ensaya-

dos, comparados con el del modelo de Busscher (obtenido en el ajuste de la Tabla 6)

Tabla 7. Valores de R^2 máximo y mínimo para los ajustes obtenidos con 12 modelos de tres parámetros incluido el modelo de Busscher, que relacionan R_p con H y DA .

Table 7. Maximum and minimum values of R^2 obtained with 12 three-parameter models including the Busscher model, relating R_p with H and DA .

Int. de pisoteo	Prof. (cm)	R^2		
		Máximo	Busscher	Mínimo
A	0 a 10	0,40	0,33	0,27
	10 a 20	0,55	0,55	0,44
B	0 a 10	0,88	0,81	0,81
	10 a 20	0,74	0,73	0,67
C	0 a 10	0,10	0,10	0,09
	10 a 20	0,07	0,06	0,06
D	0 a 10	0,20	0,11	0,03
	10 a 20	0,05	0,02	0,01

DISCUSIÓN

El alto contenido de Cox hallado en los sectores D (corrales de encierre) (Tabla 2) se atribuye a la abundante acumulación de estiércol en superficie, producido por los animales en los momentos de permanencia, posiblemente agravado por la presencia del agregado de tosca que impide las reacciones fisicoquímicas de dicha materia con los elementos naturales del suelo.

También era esperable encontrar el mayor valor de DA en superficie dentro de este grupo por la intensa carga animal existente. Sin embargo los resultados indicaron justamente lo opuesto (Tabla 3). Este hecho se atribuye al gran contenido de carbono total encontrado en estos sectores en el estrato de 0 a 10 cm, debido a los excrementos de los animales sometidos a encierre durante períodos prolongados en esos corrales (ver valores de CT en la Tabla 2). Esto explica que en el grupo D, la

DA experimentara una disminución máxima del 27,5% respecto de los valores en el estrato superficial para los otros niveles de intensidad de carga animal.

El menor valor de R_p hallado en el grupo A hasta los 10 cm, constituye un resultado esperable debido a la historia previa del lote, con 13 años de pastura genera un complejo de raíces, materia orgánica en distintos grados de degradación, microflora y microfauna, que interactúan generando mayores agregados de suelo, efecto beneficio para el desarrollo del cultivo.

La R_p resultó ser un mejor indicador de la intensidad de pisoteo a nivel superficial que la DA (Tabla 4) y para condiciones de suelo no alterado antrópicamente, puesto que el análisis estadístico mostró incrementos significativos de la R_p con el incremento de la intensidad de carga en los grupos B y C. Esto concuerda con lo afirmado por Alakuku (1996), para quien la resistencia a la penetración es un parámetro más sensible que la densidad aparente, para caracterizar la compactación del suelo estudiado.

Sin embargo, se hubiera esperado encontrar el mayor valor de R_p en el grupo de intensidad de pisoteo muy alta (D), resultado que se atribuye al amasado del suelo en condiciones de alta humedad y pisoteo, que provoca pérdida de estructura del suelo y a la existencia de gran porcentaje de carbono total producto del estiércol de los vacunos que posee escasa resistencia a la penetración.

El efecto del pisoteo y la carga animal en general sólo afectaron el nivel superficial entre 0 a 10 cm, ya que los valores expuestos en la Tabla 4 indican, que excepto para el grupo testigo, la R_p aumentó en el nivel más superficial en todos los sitios estudiados donde hubo presencia de animales.

En modelo de Busscher aplicado a los valores experimentales obtenidos, mostró un comportamiento acorde a lo esperado (disminución de R_p con el aumento de H y con la disminución de DA) solamente para el grupo testigo en la profundidad de 0 a 10 cm, aunque con un bajo coeficiente de determinación.

Se destaca también el pobre ajuste de las funciones de Busscher y Ayers para el grupo muy alta intensidad de pisoteo, así también como los valores negativos de los coeficientes de ambos modelos, lo cual indicaría que éstos no serían aplicables a suelos que han perdido estructura por amasado.

CONCLUSIONES

En función de los objetivos de este trabajo se concluyó que:

La densidad aparente presentó su máximo valor en los sectores de pisoteo alto entre 10 y 20 cm, siendo un 6% mayor que en los sectores de nula o

baja carga animal.

Para un contenido de humedad gravimétrica entre 20% y 25%, la resistencia a la penetración del suelo presentó su máximo valor en superficie para alta carga animal superando en un 70% el valor correspondiente a pisoteo nulo. La resistencia a la penetración resultó ser un buen indicador de la intensidad de carga en la profundidad de 0 a 10 cm, no así la densidad aparente.

El modelo de Busscher mostró un ajuste con sentido físico sólo para el suelo testigo, aunque con coeficientes de determinación R^2 bajos para ambas profundidades. El modelo de Ayers presentó un ajuste con sentido físico para el suelo testigo y el de alta carga animal, y con coeficientes de determinación R^2 mayores que los obtenidos con el modelo de Busscher en el suelo testigo.

Para los suelos donde se produce pérdida de estructura por amasado y con alto contenido de carbono total como ocurre en corrales de encierre, los resultados obtenidos indicarían que ambos modelos no son aplicables. Los otros once modelos de tres parámetros ensayados con las mismas variables independientes no presentaron un ajuste mejor que el dado por la función de Busscher.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por los Proyectos G089 UBACyT 2004-2007: "Elementos de diagnóstico de contaminación del suelo y el agua subterránea por producción animal intensiva"; G015 UBACyT 2008-2010: "Aspectos dinámicos de la contaminación de suelo y agua subterránea por actividad ganadera intensiva". Directora: Dra. Claudia M. Sainato y PICT 2006- N° 2413 (Agencia Nacional de Promoción Científica) Investigador Responsable: Dra. Claudia M. Sainato. Geofísica aplicada en la detección de fuentes puntuales de contaminación originadas en feedlots y en tecnologías de reutilización de sus residuos.

APÉNDICE

1. Modelos de tres parámetros ensayados

Potenciales

$$R_p = R_{p_0}(DA)^\alpha H^\beta \quad (\text{Busscher})$$

$$R_p = R_{p_0}\alpha^{(DA)}H^\beta$$

$$R_p = R_{p_0}(DA)^\alpha \beta^H$$

$$R_p = R_{p_0}\alpha^{(DA)}\beta^H$$

Polinomiales de tres parámetros

$$R_p = R_{p_0} + \alpha(DA) + \beta H$$

$$R_p = R_{p_0}\alpha(DA) + \frac{\beta}{H}$$

$$Rp = Rp_0 + \alpha \cdot \log(DA) + \beta \cdot H$$

$$Rp = Rp_0 + \alpha \cdot \log(DA) + \beta \cdot \log(H)$$

$$Rp = Rp_0 + \alpha \cdot \log(DA) + \frac{\beta}{H}$$

$$Rp = Rp_0 + \frac{\alpha}{DA} + \beta \cdot H$$

$$Rp = Rp_0 + \frac{\alpha}{DA} + \beta \cdot \log(H)$$

$$Rp = Rp_0 + \frac{\alpha}{DA} + \frac{\beta}{H}$$

BIBLIOGRAFÍA

- Alakuku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. Short term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil Tillage Res.* 37:211-222.
- AOAC. 1980. Official methods of analysis. 14th ed. Association of Official Analytical Chemists (AOAC), Washington, D.C., USA.
- Ayers, P.D., and J.V. Perumpral. 1982. Moisture and density effect on cone index. *Trans. ASAE* 25(5):1169-1172.
- Blake, G.R. 1965. Bulk density. In: C. A. Black (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and mineralogical properties, including statistics of measurements and sampling.* p. 374-390. Agronomy Monograph Series. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Botta, G., J. Ressa, H. Rosatto, M. Tourn, y E. Soza. 2005. Efecto de la labranza vertical sobre el suelo y el rendimiento del cultivo de girasol (*Helianthus annuus L.*). *Agro-Ciencia (Chile)* 21:5-12.
- Busscher W.J., and R.E. Sojka. 1987. Enhancement of subsoiling effect on soil strength conservation tillage. *Trans. ASAE* 30(4):888-892.
- Busscher, W.J. 1990. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Trans. ASAE* 33(2):519-524.
- DataFit. 2011. Version 9.0. Oakdale Engineering. Available in <http://www.curvefitting.com/> (Consulta 17 de abril de 2011).
- Donkor, N.T., J.V. Gedir, R.J. Hudson, E.W. Bork, D.S. Chanasyk, and M.A. Naeth. 2002. Impacts of grazing systems on soil compaction and pasture production in Alberta. *Can. J. Soil Sci.* 82:1-8.
- Herrick, J.E., and T.L. Jones. 2002. A dynamic cone penetrometer for measuring soil resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* (66):1320-1324.
- InfoStat. 2002. Infostat versión 1.1. Brujas Argentina. Grupo InfoStat, FCA. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Jorajuría Collazo, D. 2004. La resistencia a la penetración como parámetro mecánico del suelo. En: R. Filgueiras, y F. Micucci (eds.). *Metodologías físicas para la investigación del suelo: penetrometría e infiltrometría.* p. 43-53. Editorial de la Universidad de La Plata, La Plata, Argentina.
- Page, A.L. 1982. *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties.* SSSA, Inc., Madison, Wisconsin, USA.
- Paredes, D., J.P. D'Amico, M. Roba, A. Romito, R. Floreán, J. Cura, y M. Tesouro. 2009. Calibración del índice de cono de un suelo argiudol vértico por humedad y profundidad. p. 479-486. En N. Di Leo, S. Montico, G. Nardón (eds.) *X Congreso Argentino de Ingeniería Rural y II del Mercosur.* 1 al 4 de septiembre de 2009. Universidad Nacional de Rosario, Ciudad de Rosario, Sta. Fe, Argentina.
- Skjemstad, J.O., and J.A. Baldock. 2008. Total and organic carbon. In M.R. Carter, E.G. Gregorich (eds.). *Soil sampling and methods of analysis.* p. 225-237. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA..
- Soza, E., E. Pezzoni, M. Tourn, G. Botta, y D. Agnes. 2005. Eficiencia de la implantación en siembra directa de soja (*Glycine max (L.) Merr.*) sobre una pastura plurianual con diferente distribución de rastrojo y profundidad de siembra. VIII Congreso Argentino de Ingeniería Rural. 9 al 12 de noviembre. Ed. O.A. Barbosa. Villa de Merlo, San Luis Capital, Argentina.
- Taboada, M., y F. Micucci. 2002. Fertilidad física de los suelos. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina.
- Taboada, M.A. and R.S. Lavado. 1993. Influence of cattle trampling on soil porosity under alternate dry and ponded conditions. *Soil Use Manag.* 9(4):139-143.
- Trein, C.R., e R. Levien. 2001. Compactação do solo pelo pisoteio de gado: efeito do preparo de solo anterior. I. 239-242. En IV Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola. 9-11 mayo 2011. Chillán, Chile. Universidad de Concepción, Chillán, Chile.
- Vanags, C. 2004. The dynamic penetrometer for assessment of soil mechanical resistance. *Proceedings of the 3rd Australian New Zealand Soils Conference.* 5-9 December 2004. University of Sydney, Australia.
- Zamora, M., N. Carrasco, A. Báez, y I. Allievi. 2006. Efecto del pastoreo de verdes de invierno bajo siembra directa: efecto sobre algunas propiedades del suelo. XX Congreso de la Ciencia del Suelo. I Reunión de Suelos de la Región Andina. 19 al 22 de septiembre. Ciudades de Salta y Jujuy. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Buenos Aires, Argentina.