

LA RELACIÓN ENTRE LA DENSIDAD APARENTE Y LA RESISTENCIA MECÁNICA COMO INDICADORES DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO

RELATIONSHIP BETWEEN BULK DENSITY AND MECHANICAL RESISTANCE AS AN INDICATOR OF SOIL COMPACTION

Rafael Blanco-Sepúlveda

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. Campus de Teatinos, s/n., 29071. Málaga, España (rblanco@uma.es)

RESUMEN

La relación entre la densidad aparente (ρ_a) y la resistencia mecánica (R_m) del suelo ha originado resultados contrastantes en la literatura científica. El objetivo de este trabajo fue demostrar que existe una correlación significativa entre la ρ_a y la R_m si el muestreo es efectuado con el contenido de humedad a la capacidad de campo y se controla la profundidad de muestreo en suelos con alto contenido en gravas. La ecuación de regresión obtenida permite explicar 60 % de la variabilidad de la ρ_a a partir de la R_m y la plasticidad del suelo.

Palabras clave: Análisis de correlación y regresión, capacidad de campo, contenido de gravas, degradación física del suelo, penetrómetro, plasticidad.

INTRODUCCIÓN

La compactación es un proceso por el cual se comprime la masa de suelo como consecuencia de la aplicación de cargas o presiones. En términos físicos, la compactación disminuye el volumen de poros, modifica la estructura porosa y aumenta la densidad aparente (ρ_a) (Baver *et al.*, 1991). Un examen a microescala permite observar un cambio en la forma y continuidad de los poros, en especial una reducción del tamaño y número de los macroporos.

Estos cambios estructurales por compactación alteran las propiedades volumétricas del suelo, lo que repercute en el desarrollo y crecimiento de las plantas porque decrece la conductividad hidráulica y la capacidad de retención de agua y se altera la difusión de gases en su interior. Estos cambios provocan una deficiente aireación y un suministro inadecuado de oxígeno para el desarrollo de las plantas. Así mismo, la degradación de la estructura del suelo por compactación provoca una ralentización o paralización del desarrollo de las raíces, al aumentar la R_m (Bengough, 1991; Atwell, 1993). Los valores críticos de impedancia mecánica del suelo son variables y dependen del tipo

ABSTRACT

In scientific literature contrasting results have been reported concerning the relationship between bulk density (ρ_a) and soil penetration resistance (cone index = CI). The objective of this study was to demonstrate that there is a significant correlation between ρ_a and CI if sampling is conducted with moisture content at field capacity and sampling depth in soil with high gravel content is controlled. The regression equation obtained explained 60 % of the variability of ρ_a from CI and soil plasticity.

Key words: Correlation and regression analysis, field capacity, gravel content, physical degradation of soil, penetrometer, plasticity.

INTRODUCTION

Compaction is a process by which soil mass is compressed as a consequence of the application of weight or pressure. In physical terms, compaction reduces pore volume, modifies porous structure, and increases bulk density (ρ_a) (Baver *et al.*, 1991). At a microscale, we can observe a change in the shape and continuity of the pores, and especially a reduction in size and number of macropores.

These structural changes due to compaction alter volumetric properties of the soil, which have repercussions in the development and growth of plants since hydraulic conductivity and capacity for water retention decrease, and internal diffusion of gases is altered. These changes originate deficient aeration and insufficient oxygen supply for plant development. Also, degradation of soil structure through compaction causes decreasing or inhibition of root growth due to an increase in CI (Bengough, 1991; Atwell, 1993). Critical values of mechanical impedance of soil are variables and depend on the type of plant and on the characteristics and properties of the soil medium (Bengough, 1991). According to Graecen (1986), Bengough (1991), and Atwell (1993), with mechanical impedance values above 2 MPa, root growth is significantly reduced.

ρ_a and CI are properties used to analyze soil degradation from compaction caused by agriculture and livestock activities. The relationship between these two

* Autor responsable ♦ Author for correspondence.

Recibido: Septiembre, 2007. Aprobado: Enero, 2009.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 43: 231-239. 2009.

de planta y de las características y propiedades del medio edáfico (Bengough, 1991). Según Graecen (1986), Bengough (1991) y Atwell (1993), con valores de impedancia mecánica superiores a 2 MPa se reduce significativamente el crecimiento de las raíces.

La ρ_a y la Rm son propiedades usadas para analizar la degradación del suelo por compactación debido a las actividades agropecuarias. La relación entre ambas variables ha originado a resultados contrastantes. Así, Voorhees (1983), Sojka *et al.* (2002) y Bruand *et al.* (2004) señalan que cada una presenta una diferente sensibilidad para medir la compactación del suelo y, por tanto, no hay buena correlación entre ellas. En este sentido, la Rm sería un método más sensible para medir la compactación del suelo, sobre todo en profundidad (Voorhees, 1983; Rodd *et al.*, 1999; Clark *et al.*, 2004). Para explicar estas diferencias de sensibilidad para medir la compactación del suelo, Voorhees (1983) indica que la Rm es sensible a los cambios producidos en el suelo por microgrietas, planos de fractura y porosidad; mientras que, la ρ_a es sensible sólo a los cambios en la porosidad del suelo. Además, el diferente volumen de porosidad medido por ambos métodos, es más alto en la ρ_a (Sojka *et al.*, 2001).

Se ha observado una relación directamente proporcional entre la Rm y la ρ_a (Stitt *et al.*, 1982; Christensen *et al.*, 1989; Willat y Pullar, 1983), con correlaciones de 0.89 ($p \leq 0.05$) a 0.99 ($p \leq 0.001$) (Cruse *et al.* (1981). Sin embargo, se debe destacar que tales resultados son de experimentos en laboratorio, donde no interfieren la variabilidad ambiental y las condiciones de muestreo. Los resultados de ρ_a y Rm se caracterizan por una elevada variabilidad espacial debido a las variaciones espaciales de las condiciones ambientales en las áreas de muestreo. La Rm destaca por ser una medida puntual y, por tanto, tiende a presentar una mayor variabilidad espacial, incluso en muestreos a distancias muy próximas (Gerrard, 1982), lo cual determina la relación entre ambas variables. Por este motivo es necesario controlar los factores de variabilidad que influyen en la ρ_a y la Rm para comparar los resultados. Campbell y O'Sullivan (1991), Blanco (2000) y Lowery y Morrison (2002) indican que los factores de variabilidad más importantes son: textura, estructura, porosidad, contenido de carbonato cálcico y de gravas, exposición de ladera, pendiente, cobertura herbácea, propiedades mecánicas del suelo (consistencia, adhesividad y plasticidad), contenido de agua y capacidad de retención de agua en el suelo.

El primer objetivo de este trabajo fue determinar si hay una correlación significativa entre la ρ_a y la Rm. La hipótesis fue que esta correlación está determinada por el contenido de gravas y las condiciones de humedad del suelo en el momento del muestreo de la Rm.

variables has had contrasting results. Voorhees (1983), Sojka *et al.* (2001, and Bruand *et al.* (2004) point out that the sensitivity in measuring soil compaction of each variable is different, and therefore, there is no good correlation between them. In this sense, CI would be a more sensitive method for measuring soil compaction, especially at depth (Voorhees, 1983; Rodd *et al.*, 1999; Clark *et al.*, 2004). To explain these differences in sensitivity when measuring soil compaction, Voorhees (1983) indicates that CI stands out for being sensitive to changes produced in the soil by microfissures, fracture planes and porosity, while ρ_a is sensitive only to changes in soil porosity. Moreover, the different volume of porosity measured by either method is higher in ρ_a (Sojka *et al.*, 2001).

A directly proportional relationship between CI and ρ_a has been observed (Stitt *et al.*, 1982; Christensen *et al.*, 1989; Willat and Pullar, 1983) with correlations of 0.89 ($p \leq 0.05$) to 0.99 ($p \leq 0.001$) (Cruse *et al.*, 1981). However, it should be highlighted that these are results of laboratory experiments where environmental variability and sampling conditions do not interfere. The results of ρ_a and CI are characterized by high spatial variability due to spatial variations in environmental conditions in the sampling area. CI is a punctual measurement, and therefore, it tends to have greater spatial variability, even in samples taken at very short distances (Gerrard, 1982), which determines the relationship between the two variables. For this reason, it is necessary to control the factors of variability that affect ρ_a and CI to compare results. Campbell and O'Sullivan (1991), Blanco (2000), and Lowery and Morrison (2002) indicate that the most important factors of variability are soil texture, structure, and porosity, calcium carbonate and gravel content, slope exposure, slope gradient, grass cover, soil mechanical properties (consistency, stickiness, and plasticity), water content, and soil water retention capacity.

The first objective of this study was to determine whether there is a significant correlation between ρ_a and CI. The hypothesis was that this correlation is determined by the gravel content and soil moisture conditions at the moment of CI sampling. The second objective was to predict ρ_a from CI and the factors of variability. To this end, weight of the factors of variability in the prediction was analyzed to determine which have greater influence. The hypothesis was that these variables can be used to predict this physical property.

MATERIALS AND METHODS

The study was conducted on a goat farm affected by different degrees of compaction due to grazing. Grazing, characteristic of the

El segundo objetivo fue predecir la ρ_a a partir de la R_m y los factores de variabilidad, para lo cual se analizó el peso de los factores de variabilidad en la predicción, para determinar cuáles tienen una mayor influencia. La hipótesis fue que dichas variables se pueden usar para predecir la citada propiedad física.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en terrenos de una explotación caprina afectada por diferentes grados de compactación debido al pastoreo. El sistema de pastoreo, característico de la montaña mediterránea, es continuo y de duración diaria ya que el pastor guía el ganado en sus recorridos y regresa a las instalaciones en la noche. Este sistema genera elevadas cargas instantáneas por unidad de superficie porque afecta a pequeñas áreas, lo que favorece los senderos de pastoreo preferentes (Blanco, 2001).

La explotación tiene 176 ha y está situada en la comarca de los Montes de Málaga, 30 km al norte de la ciudad de Málaga (Casabermeja, España). El relieve es muy compartimentado, con una altitud entre 650 y 977 m y una pendiente media de 40 %. El clima es mediterráneo, la precipitación y la temperatura media anual es 701 mm y 14.2 °C. Los suelos son principalmente de textura franca, 0.5-2 % de materia orgánica, pH en agua de 6.7-8.0, capacidad de intercambio catiónico de 10.5-15.0 meq 100 g⁻¹ y tasa de saturación en bases de 85-100 %. Los suelos presentan una elevada pedregosidad superficial (muy pedregosos según la clasificación de la FAO, 1990) y un alto contenido (superior a 65 %) en gravas en el interior del perfil.

El muestreo de la ρ_a y la R_m se realizó en diciembre de 2006 en 20 parcelas de muestreo, diferenciadas en función de los factores de variabilidad que influyen en las citadas propiedades (Cuadro 1). Los métodos para determinar los factores fueron: contenido de carbonato cálcico (método visual y auditivo, FAO, 1990); tipo, tamaño y grado de la estructura, consistencia en seco y en húmedo, adhesividad y plasticidad (determinación visual y táctil, FAO, 1990); textura (método de tamizado en seco para las arenas y de la pipeta de Robinson para limo y arcilla; los tipos de texturas se agruparon según Marañés *et al.*, 1998); cobertura herbácea (método Line Intercept, Pinilla *et al.*, 1995; se realizaron tres transectos por parcela de muestreo); porosidad total (Guitian y Carballas, 1976); retención de agua en el suelo a la capacidad de campo (Cassel y Nielsen, 1986). La profundidad de muestreo de las variables edáficas se realizó en los primeros 3 cm de suelo, para hacerlo coincidir con el muestreo de la ρ_a . Todas ellas se valoraron en una escala de 1 a 4. Los contenidos de agua y gravas tienen una alta variabilidad en la zona de estudio, por lo que fue necesario controlar dichos factores directamente durante el muestreo, como se describe en los párrafos siguientes.

El muestreo en cada parcela se realizó usando transectos, haciéndolos coincidir con los senderos de pastoreo, debido a que estas zonas están dañadas por el pisoteo del ganado. El tamaño de muestreo (repeticiones) en cada parcela fue 7 (n=7) para la R_m y 3 (n=3) para la ρ_a (Montiel y Blanco, 2001).

Mediterranean mountains, is based on a continuous and short-duration grazing system, i.e. the goatherd grazes the herd until nightfall when they return to their corrals. This grazing system generates high instantaneous stocking rates per land unit because it affects small areas. This favors the preferential grazing paths (Blanco, 2001).

The farm has an area of 176 ha and is situated in the region of Montes de Málaga, 30 km north of city of Málaga (Casabermeja, Spain). The relief is quite steep, with altitudes between 650 and 977 m and a mean slope of 40 %. Climate is Mediterranean, and mean annual rainfall and temperature are 701 mm and 14.2 °C. Soils are mainly of loam texture, with 0.5-2% organic matter, 6.7-8.0 pH in water, 10.5-15.0 meq 100 g⁻¹ cationic exchange capacity, and 85-100 % base saturation rate. The soils have a very rocky surface (very rocky, according to the FAO classification, 1990) and high gravel content (more than 65 %) inside the soil.

Sampling of ρ_a and CI was conducted in December 2006 in 20 sampling plots, differentiated in function of the factors of variability that affect the mentioned properties (Table 1). The methods used to determine these factors were: calcium carbonate content (visual and audial method, FAO, 1990); type, size and grade of the structure, dry and moist consistency, stickiness and plasticity (visual and tactile determination, FAO, 1990); texture (method of dry sifting for sands and the Robinson pipette method for silt and clay; texture types were grouped following Marañés *et al.*, 1998); grass cover (Line Intercept method, Pinilla *et al.*, 1995; three transects were drawn per sampling plot); total porosity (Guitian and Carballas, 1976); soil water retention at field capacity (Cassel and Nielsen, 1986). Sampling for edaphic variables was done in the first 3 cm of soil to coincide with ρ_a sampling. All the variables were given values on a scale of 1 to 4. Water and gravel contents are highly variable in the study zone; it was thus necessary to control these factors directly during sampling, as described in the following paragraphs.

Sampling in each plot was done using intercepts, which were made to coincide with the grazing paths since these areas are damaged by trampling animals. Sample size (replications) in each plot was 7 (n=7) for CI and 3 (n=3) for ρ_a (Montiel and Blanco, 2001).

ρ_a was determined using the clod method (Brasher *et al.*, 1966). Clods were taken at a depth of 0 to 3 cm because the highest impact index from animal compaction is found in this layer (Wind and Schothorst, 1964). The high soil gravel content distorts measurements because ρ_a of the fine soil fraction is significantly lower than total ρ_a . Considering that compaction impacts the fine soil fraction, it is more significant to express ρ_a of that fraction to analyze this type of impact. Therefore, gravel was extracted following Page-Dumrouse *et al.* (1999) for soils with these characteristics. First, ρ_a was analyzed with gravel; then the clod was broken to extract the gravel and recalculate ρ_a for the fine soil without the effect of gravel.

Soil penetration resistance (CI) was determined with a hand penetrometer IB-type (Eijkelkamp) with two 100 and 150 N compression springs, together with two conical probes with 0.25 and 0.50 cm² surface area. Three CI samples were taken using combinations of degree of moisture and sampling depth. This was done in dry soil and in soil with moisture at field capacity (-33 kPa), that is, 48 h after a 31 L rainstorm that saturated the soil. Sampling

Cuadro 1. Parcelas de muestreo diferenciadas por los factores de variabilidad.
Table 1. Sampling plots differentiated by factors of variability.

Parcela	CO ₃ Ca	E-tp/tm	E-grado	Tex	CH	EL	Pend	P (%)	CC (%)	C-seco	C- hum	Adh	Plast
1	3	2	2	4	3	3	4	48.36	29.32	3	3	2	3
2	1	2	2	4	3	4	4	47.28	32.10	4	4	3	4
3	2	2	3	2	3	4	4	51.41	36.63	3	3	2	3
4	2	2	3	3	3	2	2	51.30	37.72	4	4	4	4
5	1	2	3	4	3	3	4	42.64	26.57	2	2	2	3
6	1	1	2	3	2	1	1	42.73	27.41	3	3	2	3
7	1	1	2	2	3	3	3	42.16	25.80	4	4	3	4
8	1	4	2	4	3	1	1	44.02	30.07	3	4	3	4
9	1	2	2	3	2	1	1	43.55	27.08	2	3	2	3
10	1	4	3	4	3	3	4	47.07	31.27	2	2	2	4
11	1	1	2	4	2	2	2	45.96	28.58	3	3	2	4
12	1	4	3	2	4	4	3	47.43	31.74	2	2	2	2
13	1	4	3	4	3	2	4	42.64	25.79	3	2	4	4
14	1	2	3	3	3	2	4	41.75	24.55	2	2	2	2
15	3	2	2	3	3	2	4	50.55	35.37	3	4	4	4
16	4	2	2	4	3	3	4	50.86	35.66	3	3	2	4
17	1	1	3	4	3	4	4	46.58	32.35	2	2	3	4
18	1	4	2	2	1	4	4	46.70	28.47	2	2	2	4
19	4	2	2	4	2	4	3	49.75	32.92	3	3	2	3
20	3	2	2	1	3	3	4	48.10	28.12	4	4	3	4

CO₃Ca: carbonato cálcico (1: no calcáreo; 2: ligeramente calcáreo; 3: moderadamente calcáreo; 4: fuertemente calcáreo); E-tp/tm: tipo y tamaño de estructura (1: bloques >20 mm; 2: bloques 20-10 mm; 3: bloques <10 mm; 4=granular cualquier tamaño); E-grado: grado de estructura (1: sin estructura; 2: débilmente desarrollada; 3: moderadamente desarrollada; 4: fuertemente desarrollada); Tex: textura (1: arcillosa; 2: franco-arcillo-limosa, franco-arcillosa; 3: franco-arcillo-arenosa, franco-limosa; 4: franca); CH: cobertura herbácea (1: <10 %; 2: 10-25 %; 3: 25-50 %; 4: >50 %); EL: exposición de ladera (1: indefinida, corresponde a las unidades de cumbre; 2: sur; 3: este y oeste; 4: norte); Pend: pendiente (1: <10 %; 2: 10-25 %; 3: 25-40 %; 4: >40 %); P: porosidad total (%); CC: retención de agua en el suelo a la capacidad de campo (%); C-seco: consistencia en seco (1: blando; 2: ligeramente duro; 3: duro; 4: muy duro); C-hum: consistencia en húmedo (1: muy friable; 2: friable; 3: firme; 4: muy firme); Adh: adhesividad (1: no adherente; 2: ligeramente adherente; 3: adherente; 4: muy adherente); Plast: plasticidad (1: no plástico; 2: ligeramente plástico; 3: plástico; 4: muy plástico).

La ρ_a se determinó usando el método del terrón (Brasher *et al.*, 1966). Los terrones fueron tomados a una profundidad de 0 a 3 cm, donde se produce el mayor índice de impacto por compactación animal (Wind y Schothorst, 1964). Los suelos con alto contenido en gravas desvirtúan las mediciones porque la ρ_a de la fracción fina es significativamente más baja que la ρ_a total. Considerando que el impacto por compactación se produce en la fracción fina del suelo, es más significativo expresar la ρ_a de dicha fracción para analizar este tipo de impacto. Por tanto, la extracción de gravas se realizó según Page-Dumrouse *et al.* (1999) para suelos con estas características. Primero se analizó la ρ_a con las gravas y luego se rompió el terrón para extraerlas y recalcular la ρ_a de la tierra fina sin la influencia de las gravas.

La resistencia mecánica (Rm) del suelo se determinó con un penetrómetro manual tipo IB (marca Eijkelkamp) con dos muelles de 100 y 150 N de compresión, junto con dos puntas cónicas con una superficie de área de 0.25 y 0.50 cm². Se realizaron tres muestreos de Rm usando combinaciones de grado de humedad y profundidad de muestreo. Éste se realizó en suelo seco y con contenido de agua a la capacidad de campo (-33 kPa), es decir 48 h después de un evento lluvioso de 31 L que saturó el suelo. El muestreo se realizó a 1.5 y 3 cm de profundidad, pero con suelo seco sólo a 1.5 cm debido a que la elevada compactación y pedregosidad del suelo no permitieron muestrear a mayor profundidad.

was done at a depth of 1.5 and 3 cm, but with dry soil samples were taken only at 1.5 cm because the high compaction and rocky soil did not allow sampling at the lower depth.

To determine the relationship among ρ_a , CI, and the factors of variability, a bivariate correlation analysis and a multiple linear regression analysis (stepwise method) were performed using SPSS 14.0 software.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of the results of the ρ_a and CI sampling (Table 2) indicates a higher degree of dispersion in the punctual measurements taken with the penetrometer. This coincides with the results of Gerrard (1982) as indicated above. Likewise, the first sampling taken in dry soil (Pmetro1) shows higher dispersion than the other two. The mean coefficient of variation of distribution was 21.5 %, but decreased to 14.88 % and 14.13 % for Pmetro2 and Pmetro3. Sampling in dry soil increases dispersion of the results, especially in mountain zones where there are marked microclimatic contrasts due to differences in solar radiation on soil with different slope exposure. Therefore, soils facing north show a higher moisture balance throughout the

Para determinar la relación entre la ρ_a , la Rm y los factores de variabilidad se efectuó un análisis de correlación bivariada y un análisis de regresión lineal múltiple (método stepwise), usando el programa SPSS 14.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de los resultados del muestreo de la ρ_a y la Rm (Cuadro 2) indica un mayor grado de dispersión en las medidas puntuales realizadas con el penetrómetro, lo que coincide con los resultados de Gerrard (1982) como ya se indicó. A su vez, el primer muestreo realizado en suelo seco (Pmetro1) muestra una dispersión mayor que los otros dos. El coeficiente de variación medio de la distribución fue 21.5 %, pero se redujo a 14.88 % y 14.13 % para los muestreos Pmetro2 y Pmetro3. El muestreo en suelo seco aumenta la dispersión de los resultados, sobre todo en las zonas de montaña donde hay marcados contrastes microclimáticos a causa de la diferente radiación solar que incide en suelos con distintas exposiciones de ladera. Por tanto, los suelos con exposición norte presentan un balance de humedad mayor durante el año que los suelos de laderas expuestos a solana, porque los procesos de humectación-dsecación

year than soils exposed to the sun because the processes of wetting and drying are milder. Thus, the sample in dry soil, or rather apparently dry, introduces a factor of variability in initial environmental conditions, which is reflected in the results.

Soane *et al.* (1980), Busscher *et al.* (1997), and Pires da Silva *et al.* (2002) recognize the effect of water content on the variability of the results. Pires da Silva *et al.* (2002) indicate that 43 % of the variation of CI is attributable to soil moisture. Therefore, it is necessary to sample in homogeneous conditions of moisture to reduce the variations attributed to soil water content.

The correlation analysis (Table 3) indicates that the most significant results between ρ_a and CI were obtained with the samples taken in soil with moisture content at field capacity and a sampling depth of 1.5 cm (Pmetro2; R=0.69; p≤0.01), while the correlation between the remaining CI samples and ρ_a was not significant (p>0.05). At the same time, ρ_a correlated significantly (p≤0.05) with the following factors of variability: dry and moist soil consistency, stickiness and plasticity.

The analysis of these results leads us to deduce the effects of soil moisture conditions and the interferences

Cuadro 2. Valores de la media, desviación estándar y coeficiente de variación de la densidad aparente, y de los muestreos con penetrómetro. Table 2. Values of the mean, standard deviation, and coefficient of variation of bulk density, and of sampling with a penetrometer.

Parcelas	ρ_a			Pmetro1			Pmetro2			Pmetro3		
	Media (g cm ⁻³)	Desv. Est.	CV (%)	Media (kg cm ⁻²)	Desv. Est.	CV (%)	Media (kg cm ⁻²)	Desv. Est.	CV (%)	Media (kg cm ⁻²)	Desv. Est.	CV (%)
1	1.52	0.085	5.59	33.65	8.35	24.81	11.78	1.80	15.28	18.07	0.64	3.54
2	1.70	0.024	1.41	18.27	5.24	28.68	16.23	1.44	8.87	- [†]	-	-
3	1.29	0.019	1.47	48.98	6.56	13.39	9.11	1.17	12.84	16.23	1.66	10.23
4	1.65	0.038	2.30	24.16	6.51	26.95	10.33	1.20	11.62	13.80	2.10	15.22
5	1.59	0.094	5.91	47.35	7.96	16.81	11.46	2.36	20.59	13.60	3.60	26.47
6	1.47	0.098	6.67	45.00	10.77	23.93	11.83	2.13	18.01	15.72	3.07	19.53
7	1.65	0.021	1.27	42.93	8.08	18.82	16.03	1.16	7.24	- [†]	-	-
8	1.59	0.013	0.82	43.69	6.00	13.73	14.00	1.34	9.57	17.80	0.56	3.15
9	1.57	0.065	4.14	26.62	8.98	33.73	8.60	1.44	16.74	14.00	1.97	14.07
10	1.47	0.057	3.88	37.53	11.40	30.38	10.89	1.15	10.56	15.67	1.60	10.21
11	1.44	0.040	2.78	21.76	5.18	23.81	8.34	1.72	20.62	15.33	2.41	15.72
12	0.85	0.077	9.06	12.78	1.83	14.32	3.74	0.63	16.84	8.20	1.61	19.63
13	1.59	0.116	7.30	29.07	8.70	29.93	8.11	1.58	19.48	13.50	1.55	11.48
14	1.41	0.122	8.65	42.93	8.20	19.10	7.57	0.84	11.10	11.64	2.23	19.16
15	1.60	0.078	4.88	24.65	7.62	30.91	10.51	1.43	13.61	11.80	2.37	20.08
16	1.38	0.003	0.22	8.66	1.14	13.16	6.71	1.36	20.27	8.45	0.66	7.81
17	1.32	0.116	8.79	6.67	0.92	13.79	8.91	2.12	23.79	12.27	3.58	29.18
18	1.48	0.049	3.31	20.13	5.74	28.51	5.93	0.70	11.80	12.68	1.89	14.91
19	1.44	0.034	2.36	37.09	4.52	12.19	12.09	1.21	10.01	18.40	0.95	5.16
20	1.47	0.023	1.56	45.87	5.99	13.06	9.69	1.81	18.68	18.40	1.63	8.86
Media	1.47	0.06	4.12	30.89	6.48	21.50	10.09	1.43	14.88	14.20	1.89	14.13

Pmetro1: muestreo en suelo seco, muelle 150 N, cono 0.25 cm² y profundidad de muestreo 1.5 cm; Pmetro2: muestreo en suelo a la capacidad de campo, muelle 100 N, cono 0.5 cm² y profundidad de muestreo 1.5 cm; Pmetro3: muestreo con suelo a la capacidad de campo, muelle 100 N, cono 0.5 cm² y profundidad de muestreo 3 cm. Desv. Est.: desviación estándar. CV: coeficiente de variación.

[†] El muestreo no fue realizado debido a la elevada compactación y pedregosidad del suelo.

son más suaves. Así, el muestreo en suelo seco, o más bien aparentemente seco, introduce un factor de variabilidad en las condiciones ambientales iniciales, lo que se refleja en los resultados.

Soane *et al.* (1980), Busscher *et al.* (1997) y Pires da Silva *et al.* (2002) reconocen la influencia del contenido de agua en la variabilidad de los resultados. Pires da Silva *et al.* (2002) indican que 43 % de la variación de la Rm es atribuible a la humedad del suelo. Por tanto, es necesario muestrear en condiciones homogéneas de humedad para reducir las variaciones atribuidas al contenido de agua en el suelo.

El análisis de correlación (Cuadro 3) indica que los resultados más significativos entre ρ_a y Rm se obtuvieron con el muestreo realizado en suelo con un contenido de humedad a la capacidad de campo y a una profundidad de muestreo de 1.5 cm (Pmetro2; $R=0.69$; $p \leq 0.01$), mientras que la correlación de los restantes muestreos de Rm con la ρ_a , no fue significativa ($p > 0.05$). Al mismo tiempo, la ρ_a se correlacionó significativamente ($p \leq 0.05$) con los siguientes factores de variabilidad: consistencia del suelo en seco y en húmedo, adhesividad y plasticidad.

El análisis de estos resultados permite deducir las influencias de las condiciones de humedad del suelo y las interferencias que producen las gravas en el interior del perfil. El coeficiente de correlación más bajo con la ρ_a ($R=0.28$) fue con el primer muestreo de Rm (Pmetro1), el cual se realizó con el suelo seco. Así se confirma este factor de dispersión como causa de la reducida significación en la correlación. Las gravas del suelo interfieren en los resultados mediante la influencia de la profundidad de muestreo. Por este motivo, los resultados fueron mejores en el muestreo realizado hasta 1.5 cm de profundidad (Pmetro2) ($R=0.69$) que en el muestreo a 3 cm (Pmetro3) ($R=0.44$). Por tanto, se puede deducir que los muestreos a menor profundidad evitan parcialmente la interferencia de la pedregosidad.

En el análisis de regresión lineal múltiple la variable dependiente fue la ρ_a y las independientes fueron aquellas con $p \leq 0.05$. El análisis de regresión introdujo en el modelo la Rm (Pmetro2) y la plasticidad como variables de predicción; las demás variables fueron excluidas. La plasticidad fue el único factor de variabilidad que tuvo mayor peso para predecir la ρ_a . Las ecuaciones de regresión son:

$$\rho_a = 0.04 \text{ Pmetro2} + 1.066 \quad (1)$$

$$\rho_a = 0.033 \text{ Pmetro2} + 0.97 \text{ Plast} + 0.893 \quad (2)$$

La ecuación (1) indica una relación significativa ($R^2=0.48$; $p=0.001$) entre la ρ_a y la Rm. Esta última

gravel produces within the soil. The lowest correlation coefficient between CI and ρ_a ($R=0.28$) resulted with the first CI sampling (Pmetro1), which was carried out with dry soil. This confirms this factor of dispersion as the cause of the reduced significance in the correlation. Soil gravels interfere in the results by means of the influence of the sampling depth. For this reason, the results were better in the sampling done to 1.5 cm deep (Pmetro2) ($R=0.69$) than in the sampling at 3 cm (Pmetro3) ($R=0.44$). Therefore, it can be deduced that sampling at a shallower depth partially avoids interference from rockiness.

For the multiple linear regression analysis the dependent variable was ρ_a , and the independent variables were those with $p \leq 0.05$. The regression analysis introduced CI (Pmetro2) and plasticity in the model as prediction variables; the other variables were excluded. Plasticity was the only factor of variability that had greater weight in predicting ρ_a . The regression equations are:

$$\rho_a = 0.04 \text{ Pmetro2} + 1.066 \quad (1)$$

$$\rho_a = 0.033 \text{ Pmetro2} + 0.97 \text{ Plast} + 0.893 \quad (2)$$

Equation (1) indicates a significant relationship ($R^2=0.48$; $p=0.001$) between ρ_a and CI. The latter explains 48 % of the variability of ρ_a and in Figure 1 a positive linear relationship is observed between these variables. This result is similar to that obtained by House *et al.* (2001), who indicate that 52 % of the ρ_a values can be explained by CI. Equation (2) improves these results ($R^2=0.60$; $p=0.000$) by introducing the variable plasticity. In this case, 60 % of the results with ρ_a , CI, and plasticity can be explained, indicating that plasticity would explain 12% of the variability of ρ_a .

These results respond to the close relationship between soil plasticity and consistency. Therefore, this quality is often used to characterize mechanical behavior of soil. This coincides with the results obtained by Ball *et al.* (2000), who indicate that plasticity is an important variable in predicting a soil's susceptibility to compaction.

CONCLUSIONS

Bulk density (ρ_a) correlates significantly with soil penetration resistance (cone index = CI), a result obtained by maintaining some particular CI sampling conditions. Sampling done with soil at field capacity and a depth of 1.5 cm was the most significant ($R=0.69$; $p \leq 0.01$). Soil sampling under homogeneous conditions of moisture is fundamental to reduce dispersion in the

Cuadro 3. Análisis de correlación entre la densidad aparente, la resistencia mecánica y los factores de variabilidad.
Table 3. Correlation analysis between bulk density, soil penetration resistance and factors of variability.

	ρ_a	Pmetro1	Pmetro2	Pmetro3	CO ₃ Ca	E-tp/tm	E-grado	Tex	CH	EL	Pend	P	CC	C-seco	C- hum	Adh	Plast
ρ_a	1	0.28	0.69 [†]	0.44	-0.01	-0.20	-0.29	0.28	-0.29	-0.40	-0.10	-0.20	-0.17	0.46 [¶]	0.49 [¶]	0.45 [¶]	0.56 [¶]
Pmetro1	0.28	1	0.43	0.68 [†]	-0.05	-0.05	0.01	-0.23	-0.02	-0.27	-0.12	-0.33	-0.37	0.16	0.16	-0.14	-0.23
Pmetro2	0.69 [†]	0.43	1	0.76 [†]	-0.02	-0.31	-0.36	0.24	0.04	-0.11	-0.16	-0.16	-0.06	0.57 [†]	0.61 [†]	0.26	0.33
Pmetro3	0.44	0.68 [†]	0.76 [†]	1	0.14	-0.12	-0.31	0.05	-0.27	-0.14	-0.23	-0.01	-0.14	0.43	0.41	-0.03	0.17
CO ₃ Ca	-0.01	-0.05	-0.02	0.14	1	-0.19	-0.35	0.01	0.04	0.20	0.26	0.70 [†]	0.51*	0.33	0.33	0.02	0.07
E-tp/tm	-0.20	-0.05	-0.31	-0.12	-0.19	1	0.31	-0.01	0.11	0.07	0.12	-0.01	-0.02	-0.33	-0.33	0.04	0.00
E-grado	-0.29	0.01	-0.36	-0.31	-0.35	0.31	1	0.08	0.47 [¶]	0.15	0.32	-0.10	0.03	-0.35	-0.59 [†]	0.17	-0.24
Tex	0.28	-0.23	0.24	0.05	0.01	-0.01	0.08	1	0.000	-0.15	-0.04	-0.08	0.06	-0.18	-0.19	-0.01	0.16
CH	-0.29	-0.02	0.04	-0.27	0.04	0.11	0.47 [¶]	0.00	1	0.13	0.28	0.12	0.23	0.14	0.07	0.30	-0.18
EL	-0.40	-0.27	-0.11	-0.14	0.20	0.07	0.15	-0.15	0.13	1	0.68 [†]	0.44	0.32	-0.05	-0.25	-0.21	-0.03
Pend	-0.10	-0.12	-0.16	-0.23	0.26	0.12	0.32	-0.04	0.28	0.68 [†]	1	0.28	0.11	-0.08	-0.32	0.05	0.06
P	-0.20	-0.33	-0.16	-0.01	0.70 [†]	-0.01	-0.10	-0.08	0.12	0.44	0.28	1	0.91 [†]	0.27	0.29	0.11	0.20
CC (%)	-0.17	-0.37	-0.06	-0.14	0.51 [¶]	-0.02	0.03	0.06	0.23	0.32	0.12	0.91 [†]	1	0.23	0.31	0.21	0.22
C-seco	0.46 [¶]	0.16	0.57 [†]	0.43	0.33	-0.33	-0.35	-0.18	0.14	-0.05	-0.08	0.27	0.23	1	0.84 [†]	0.52 [¶]	0.46 [¶]
C- hum	0.49 [¶]	0.16	0.61 [†]	0.41	0.34	-0.34	-0.59 [†]	-0.18	0.07	-0.25	-0.32	0.29	0.31	0.84 [†]	1	0.46 [¶]	0.42
Adh	0.45 [¶]	-0.14	0.26	-0.03	0.02	0.04	0.17	-0.01	0.30	-0.21	0.05	0.11	0.21	0.52 [¶]	0.46 [¶]	1	0.55 [¶]
Plast	0.56 [¶]	-0.23	0.33	0.17	0.07	0.00	-0.24	0.16	-0.18	-0.03	0.06	0.20	0.22	0.46 [¶]	0.42	0.55 [¶]	1

[†] La correlación es significativa ($p \leq 0.01$; bilateral).

[¶] La correlación es significativa ($p \leq 0.05$; bilateral).

E-tp/tm: tipo y tamaño de estructura; E-grado: grado de estructura; Tex: textura; CH: cobertura herbácea; EL: exposición de ladera; Pend: pendiente; P: porosidad; CC: retención de agua en el suelo a la capacidad de campo; C-seco: consistencia en seco; C-hum: consistencia en húmedo; Adh: adhesividad; Plast: plasticidad.

explica 48 % de la variabilidad de la ρ_a y en la Figura 1 se observa una relación lineal positiva entre estas variables. Este resultado es similar al obtenido por House *et al.* (2001), quienes indican que 52 % de los valores de la ρ_a pueden ser explicados por la Rm. La ecuación (2) mejora los resultados anteriores ($R^2=0.60$; $p=0.000$) al introducir la variable plasticidad. En este caso se puede explicar 60 % de los resultados de ρ_a con la Rm y la plasticidad, lo que supone que esta última variable explicaría 12 % de la variabilidad de la ρ_a .

Estos resultados responden a la estrecha relación entre la plasticidad y la consistencia del suelo. Por tanto, esta cualidad suele ser usada para caracterizar el comportamiento mecánico del suelo. Esto coincide con los resultados obtenidos por Ball *et al.* (2000), quienes indican que la plasticidad es una variable importante para predecir la susceptibilidad a la compactación del suelo.

CONCLUSIONES

La densidad aparente (ρ_a) presenta una correlación significativa con la resistencia mecánica (Rm) del suelo, resultado obtenido manteniendo unas condiciones particulares de muestreo para la Rm. El muestreo realizado con el suelo a la capacidad de campo y a una profundidad de 1.5 cm fue el más significativo ($R=0.69$; $p\leq 0.01$). El muestreo de suelos en condiciones homogéneas de humedad es fundamental para reducir la dispersión en los resultados y obtener una relación significativa entre ambas propiedades. El contenido de gravas del suelo interfiere en los resultados a partir de la profundidad de la toma de muestras. Así, al aumentar la profundidad de muestreo en suelos con un alto contenido en gravas, aumenta la dispersión de los resultados y éstos se alejan de los efectos atribuibles a la compactación del suelo. En tales condiciones, la relación entre la ρ_a y la Rm es poco significativa.

La relación fue altamente significativa entre la ρ_a , la Rm y la plasticidad, explicando 60 % de la variabilidad de la ρ_a . La Rm explicaría 48 % de la variabilidad de la ρ_a y la plasticidad, el 12 % restante.

LITERATURA CITADA

- Atwell, B. J. 1993. Response of roots to mechanical impedance. *Environ. Exp. Bot.* 33(1): 27-40.
- Ball, B. C., D. J. Campbell, and E. A. Hunter. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil and Tillage Res.* 57: 83-91.
- Baver, L. D., W. H. Gardner, and W. R. Gardner. 1991. *Física de Suelos*. Limusa. México. 529 p.
- Bengough, A. G. 1991. The penetrometer in relation to mechanical resistance to root growth. *In: Smith, K. A., and CH. Mullins (eds). Soil Analysis. Physical Methods.* Marcel Dekker, Inc. New York. pp: 431-445.

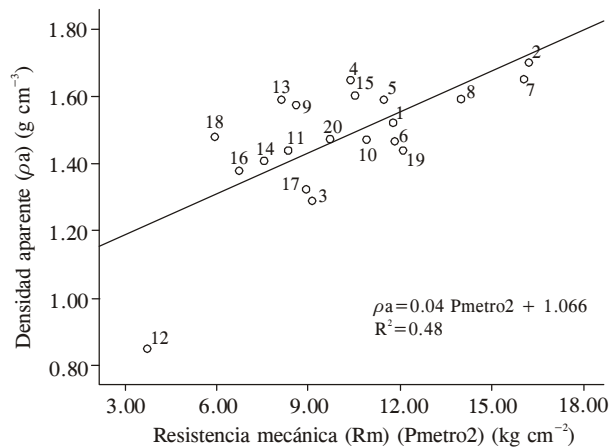
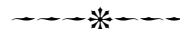


Figura 1. Diagrama de dispersión y recta de regresión de la densidad aparente y la resistencia mecánica del suelo.
Figure 1. Dispersion diagram and regression line of soil bulk density and mechanical resistance.

results and to obtain a significant relationship between the two properties. Gravel content of the soil interferes with the results beginning with the depth of sampling. Thus, when sampling depth increases in soils with high gravel content, dispersion of the results increases, taking them further from the effects attributable to soil compaction. Under these conditions, the relationship between ρ_a and CI is not significant.

The relationship between ρ_a , CI and plasticity was highly significant, explaining 60 % of the variability of ρ_a . CI explains 48 % of the variability of ρ_a , while plasticity explains the remaining 12 %.

—End of the English version—



- Blanco, R. 2000. Propuesta Metodológica para la Aplicación del Análisis de las Propiedades Físicas Edáficas a la Evaluación del Suelo para Usos Ganaderos. Tesis Doctoral. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Málaga. 434 p.
- Blanco, R. 2001. Variaciones estacionales en la gestión del pastoreo en una explotación caprina lechera de un área de montaña mediterránea. *Pirineos* 156: 119-134.
- Brasher, B. R., D. P. Franzmeier, V. Valassis, and S. E. Davidson. 1966. Use of Saran Resin to coat natural soil clods for bulk density and moisture retention measurements. *Soil Sci.* 101: 108.
- Bruand, A., CH. Hartmann, S. Ratana-Anupap, P. Sindhusen, R. Poss and M. Hardy. 2004. Composition, fabric and porosity of an Arenic Haplustalf of Northeast Thailand: Relation to penetration resistance. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 185-193.
- Busscher, W. J., P. J. Bauer, C. R. Camp, and R. E. Sojka. 1997. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. *Soil Tillage Res.* 43: 205-217.
- Campbell, D. J. and M. F. O'Sullivan. 1991. The cone penetrometer in relation to trafficability, compaction and tillage. *In: Smith, K. A., and CH. Mullins (eds). Soil Analysis. Physical Methods.* Marcel Dekker, Inc. New York. pp: 399-429.

- Cassel, D. K., and D. R. Nielsen. 1986. Field capacity and available water capacity. *In*: Page, A. L., R. H. Miller, and D. R. Keeney (eds). *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Second Edition. Agronomy 9. Madison, Wisconsin, USA. pp: 901-926.
- Christensen, N. B., J. B. Sisson, and P. L. Barnes. 1989. A method for analyzing penetration resistance data. *Soil and Tillage Res.* 13: 83-91.
- Clark, J. T., J. R. Russell, D. L. Karlen, P. L. Singleton, W. D. Busby, and B. C. Peterson. 2004. Soil surface property and soybean yield response to corn stover grazing. *Agron. J.* 96: 1364-1371.
- Cruse, R. M., D. K. Cassel, R. E. Stitt, and F. G. Averette. 1981. Effect of particle surface roughness on mechanical impedance of coarse textured soil materials. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 1210-1214.
- FAO. 1990. *Guidelines for Soil Description*. 3rd edition. Roma. 70 p.
- Gerrard, A. J. 1982. The use of hand-operated soil penetrometers. *Area* 14: 227-234.
- Graecen, E. L. 1986. Root response to soil mechanical properties. *Trans. 13th Congress Inter. Soc. Soil Sci. Hamburg* 5: 20-47.
- Gutián, F., y T. Carballas. 1976. *Técnicas de Análisis de Suelos*. Pico Sacro, Santiago de Compostela. 288 p.
- House, M. L., W. L. Powers, D. E. Eisenhauer, D. B. Marx, and D. Fekersillassie. 2001. Spatial analysis of machine-wheel traffic effects on soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1376-1384.
- Lowery, B., and J. E. Morrison. 2002. Soil penetrometers and penetrability. *In*: Dane, J. H., and G. Clarke (eds). *Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America. Madison, Wisconsin, USA. pp: 363-388.
- Marañés, A., J. A. Sánchez, S. De Haro, S. T. Sánchez, y F. Del Moral. 1998. *Análisis de Suelos. Metodología e Interpretación*. Universidad de Almería. 184 p.
- Montiel, A. M., y R. Blanco. 2001. Métodos de optimización de muestreo en los estudios de las propiedades físicas del suelo. *Edafología* 8: 51-59.
- Page-Dumrouse, D. S., M. F. Jurgensen, R. E. Brown, and G. D. Mroz. 1999. Comparison of methods for determining bulk densities of rocky forest soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(2): 379-383.
- Pinilla, P., R. Tamanjón, y J. M. Muñoz. 1995. Vegetación actual del P.N. Sierra de Hornachuelos. *In*: Moreira, J.M. (ed). *Reconocimiento Biofísico de Espacios Naturales Protegidos*. P.N. Sierra de Hornachuelos. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. pp: 231-318.
- Pires Da Silva, A., S. Imhoff, and M. Corsi. 2002. Soil compaction versus cow-stocking rates on an irrigated grazing system. *In*: Pagliai, M., and R. Jones (eds). *Sustainable Land Management – Environmental Protection. A Soil Physical Approach*. *Adv. in GeoEcology* 35: 397-406.
- Rodd, A. V., Y. A. Papadoulou, L. F. Laflamme, K. B. McRae, S. A. B. Fillmore, and R. W. Wilson. 1999. Effect of rotational grazing on selected physical properties of a Gleyed Brunisolic Gray Luvisol loam in Nova Scotia. *Can. J. Soil Sci.* 79: 117-125.
- Soane, B. D., P. S. Blackwell, P. S. Dickson, and D. J. Painter. 1980. Compaction by agricultural vehicles: a review. I. Soil and wheel characteristics. *Soil and Tillage Res.* 1: 207-237.
- Sojka, R. E., W. J. Busscher, and G. A. Lehrs. 2001. In situ strength, bulk density and water content relationships of a Durinodic Xeric Haplocalcid soil. *Soil Sci.* 166: 520-529.
- Stitt, R. E., D. K. Cassel, S. B. Weed, and L. A. Welson. 1982. Mechanical impedance of tillage pans in Atlantic Coastal Plains soil and relationships with soil physical, chemical and mineralogical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 100-106.
- Voorhees, W. B. 1983. Relative effectiveness of tillage and natural forces alleviating wheel induced soil compaction. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 129-133.
- Willat, S. T., and D. M. Pullar. 1983. Changes in soil physical properties under grazed pastures. *Aust. J. Soil Res.* 22: 343-348.
- Wind, G. P., and C. J. Schothorst. 1964. The influence of soil properties on suitability for grazing and of grazing on soil properties. *Trans. of the Eighth Int. Congress of Soil Sci. Bucharest*. pp: 571-580.