

Nota técnica

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN, AL CORTE TANGENCIAL, DENSIDAD APARENTE Y TEMPERATURA EN UN SUELO CAFETALERO, JUAN VIÑAS, COSTA RICA

Carlos Henríquez^{1/}, Oscar Ortiz^{**}, Keneth Largaespada^{***}, Pamela Portugués^{***},
Maylin Vargas^{***}, Pamela Villalobos^{***}, Diego Gómez^{***}*

Palabras clave: Propiedades físicas del suelo, compactación, densidad, penetrabilidad.
Keywords: Physical soil properties, compaction, density, penetrability.

Recibido: 05/10/10

Aceptado: 01/04/11

RESUMEN

En un suelo cultivado con café en Juan Viñas, Costa Rica, se determinó la resistencia a la penetración (con 2 tipos de penetrómetros) y al corte tangencial, densidad aparente, humedad gravimétrica y temperatura en la superficie y a 15 cm de profundidad; se eligieron y georeferenciaron 3 puntos dentro de un lote de 0,35 ha en un Dystrudept ubicado en Juan Viñas, Costa Rica. Los valores de resistencia a la penetración en la superficie fueron 1,60 y 0,30 MPa con el tipo de penetrómetro “Chatillón” y “Soil-Test” respectivamente, en tanto que los obtenidos a 15 cm fueron de 0,73 y 0,15 MPa en el mismo orden; asimismo, el contenido de humedad gravimétrica fue de 30,37 y 42,08%, respectivamente. A pesar de que también se encontraron mayores valores en la superficie que a los 15 cm, tanto para la resistencia al corte tangencial (0,028 y 0,025 Mpa) como para la densidad aparente (0,98 y 0,93 Mg.m⁻³ respectivamente), estas diferencias no fueron significativas. Los valores de resistencia a la penetración de ambos tipos

ABSTRACT

Penetration resistance, tangential shear strength, bulk density and temperature in a soil planted with coffee, Juan Viñas, Costa Rica. Bulk density, tangential shear strength, resistance to penetration (with two types of penetrometer), gravimetric moisture and temperature at the surface and 15 cm deep, were determined in a soil planted with coffee. Three points were georeferenced inside a 0.4 ha lot in a Dystrudept located in Juan Viñas, Costa Rica. By comparing the 2 depths, significant differences were found only for the variables resistance to penetration (1.60 and 0.73 MPa with the penetrometer “Chatillon”; and 0.30 and 0.15 MPa with the penetrometer “Soil Test”) and gravimetric moisture content (30.37 and 42.08%, respectively). Although higher values were also found on the surface for both the tangential shear strength (0.028 and 0.025 MPa) and for bulk density (0.98 and 0.93 Mg.m⁻³ respectively), these differences were not significant. The values of resistance to penetration of both types of

1/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: carlos.henriquez@ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas y Sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

** Empresa Hacienda Juan Viñas. Costa Rica.

*** Estudiantes del Curso Relación Suelo Planta AF-0122 (2010), Sede del Atlántico de la Universidad de Costa Rica.

de penetrómetros correlacionaron positivamente entre sí (0,65**). La densidad aparente y la resistencia a la penetración medidas con el aparato “Chatillon” guardaron una correlación positiva (0,41+), lo cual concuerda con el hecho de que ambas variables son utilizadas para diagnosticar problemas de compactación. Se encontró además una correlación negativa entre la resistencia a la penetración y el contenido de humedad (-0,68**) y una correlación positiva entre esta última variable y la temperatura (0,41+). Con base en los resultados de este estudio, se logró constatar que la superficie del suelo del lote evaluado presentó una mayor compactación que a la profundidad de 15 cm, lo cual se puede relacionar con 2 aspectos: el tránsito humano intenso sobre la plantación, producto de las prácticas agrícolas realizadas en el cultivo, y en cierta forma el menor valor de humedad presentado.

INTRODUCCIÓN

El estudio de las propiedades físicas del suelo tiene un papel preponderante en la caracterización de su productividad. En particular, la compactación afecta negativamente tanto en forma directa como indirecta diversas propiedades del suelo como la estructura, la dinámica del agua y el aire así como procesos de oxidación-reducción y poblaciones de organismos, por citar solo algunos ejemplos (Henríquez y Cabalceta 1999, Porta et al. 2003). La compactación del suelo es un empaquetamiento de las partículas que constituyen la fracción sólida, lo que se traduce en una disminución del espacio poroso total y consecuentemente, en un aumento de la densidad aparente. Al ocurrir esto, también se restringe el desarrollo radical, aspecto que fue reportado en trabajos como los de Veihmeyer y Hendrickson (1948) y Bengough y Mullins (1991), quienes establecieron la relación directa que existe entre la penetración de raíces con la densidad del suelo y la resistencia a la

penetrometer correlated positively with each other (0.65**). Bulk density and penetration resistance measured with the device “Chatillon” kept a positive correlation (0.41+), which agrees with the fact that both variables are used to diagnose compaction problems. There was also a negative correlation between penetration resistance and moisture content (-0.68**) and a positive correlation between the latter variable and temperature (0.41+). Based on the results of this study, it could be verified that the surface had a higher compaction than the 15 cm-depth, which can be related to the frequent human traffic on the plantation, as a result of farming practices carried out in the crop, and also because of the lower soil humidity values found there.

penetración. Forsythe et al. (2005) menciona que el diagnóstico de las condiciones intermedias de compactación puede ayudar a detectar a tiempo el apareamiento de condiciones extremas lo cual puede permitir llevar a cabo acciones preventivas. Alvarado y Forsythe (2005) reportan que para 111 suelos de Costa Rica representativos de 9 órdenes según el sistema USDA (Soil Survey Staff 2010), la densidad aparente varió de 0,53 a 2,00 Mg.m⁻³, datos que dejan en manifiesto el efecto de la diversidad pedogenética sobre esta variable. Henríquez y Cabalceta (1999) mencionan que la densidad aparente en conjunto con la resistencia a la penetración y el espacio aéreo, han sido utilizados como índices para medir la compactación del suelo. La compactación se refleja también en un aumento de la resistencia mecánica o dureza del suelo, la cual es posible medirla con un penetrómetro. Este aparato mide la combinación de falla tangencial, compactación y flujo plástico; el valor crítico para esta variable propuesto por Forsythe (1985) ha sido de 2,96 MPa a capacidad de campo. Este mismo autor

propone igualmente la utilización de cuchillas de torsión como otra medida indirecta de la dureza del suelo. Este aparato mide el esfuerzo que se debe realizar para hacer un corte tangencial al suelo, característica que luego se puede relacionar con la potencia de maquina requerida para su preparación (Henríquez y Cabalceta 1999). Otras propiedades físicas de importancia son la humedad y la temperatura. Con el contenido de humedad del suelo es posible caracterizar el estado de saturación y calcular junto con otras variables la lámina de agua correspondiente. La temperatura por otro lado, tiene un efecto directo sobre el crecimiento de las plantas así como en procesos químicos y el grado de actividad de diversos tipos de organismos en el suelo (Henríquez y Cabalceta 1999, Gavande 1979, Porta et al. 2003).

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del ensayo

El sitio estuvo ubicado en la localidad de Juan Viñas, cantón de Jiménez, Costa Rica. Allí se eligió un lote de aproximadamente 0,35 ha el cual había estado sembrado con café por más de 20 años. El suelo clasificado como Dys-trudept, presentó una topografía ondulada con

30% de pendiente. En el lote se ubicaron en forma aleatoria 3 puntos los cuales fueron georeferenciados con una GPS; luego se procedió a hacer las determinaciones que se realizaron a 2 profundidades: una superficial y otra a 15 cm. La posición geográfica en CRTM05 de los 3 sitios fue: Punto 1 N-1093074,51 O-527860,53 Punto 2 N-1093071,53 O-527850,05 y Punto 3 N-1093083,38 O-527825,92 (Figura 1). En cada punto y para cada una de las 2 profundidades, se determinaron por triplicado las variables que se describen a continuación, lo que produjo un total de 9 repeticiones por variable y por cada profundidad evaluada.

Evaluaciones

Las evaluaciones fueron realizadas en mayo iniciada ya la época lluviosa. La resistencia a la penetración se determinó con 2 tipos de penetrómetros ambos de pistón y del tipo estático que en este estudio se denominarán “chatillon” y “soil test”. En este caso la diferencia entre ambos fue el diámetro del pistón: 5 y 6 mm respectivamente. Para hacer cada determinación, se procedió a limpiar la superficie con el fin de asegurarse de hacer las determinaciones sobre el suelo y no sobre alguna piedra o material extraño (Figura 2); esto mismo se aplicó para las otras variables

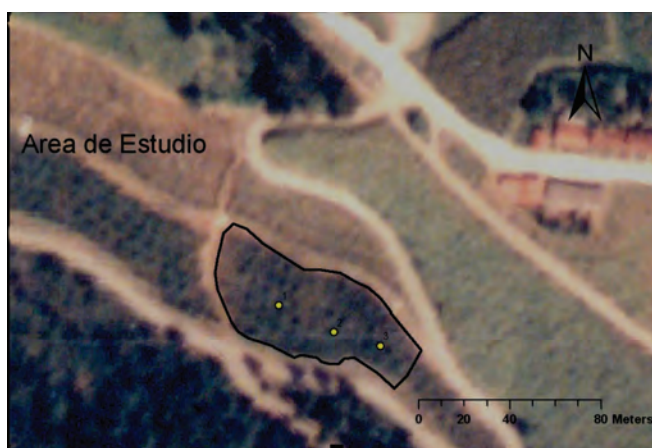


Fig. 1. Foto aérea con la ubicación de los puntos de muestreo usados en este estudio en una plantación de café, Juan Viñas, Turrialba.



Fig. 2. Representación de la determinación de la resistencia a la penetración utilizando los penetrómetros “Chatillón” y “soil test” en un suelo cultivado con café en Juan Viñas, Costa Rica.

del estudio y tanto en la determinación a nivel superficial como a los 15 cm de profundidad. Para esta última se procedió a escarbar con una pala y medir con una cinta métrica hasta alcanzar la profundidad deseada de 15 cm. Una vez lista la superficie de determinación, el penetrómetro se introdujo suavemente en el suelo y en forma constante hasta alcanzar la marca de penetración la cual es de 5 mm de profundidad (Henríquez y Cabalceta 1999).

Para la determinación de la resistencia al corte tangencial se utilizó una cuchilla de torsión “Torvane” sugerida por Forsythe (1985), la cual

se introdujo al suelo hasta la altura de las cuchillas y luego se hizo girar suavemente el rotor en el sentido de las manecillas del reloj hasta encontrar el punto de falla o corte (Figura 3); luego de ello la lectura en la escala fue anotada.

La temperatura fue determinada con un termómetro digital de punta metálica de 10 cm de largo con una precisión de 0,01°C, el cual fue introducido en el suelo y dejado allí por 2 min para su estabilización, luego de lo cual se procedió a tomar la lectura correspondiente.

Para la densidad aparente se tomaron muestras indisturbadas con la utilización de



Fig. 3. Representación de la determinación del corte tangencial con una cuchilla de torsión “Torvane” sobre la superficie de un suelo cultivado con café en Juan Viñas, Costa Rica.

cilindros metálicos de 131,67 cm³ de volumen los cuales fueron introducidos en el suelo hasta alcanzar el borde superior, luego de lo cual fue extraído del suelo con la muestra, aforado y limpiado externamente y colocado en una bolsa plástica cerrada herméticamente para su transporte al laboratorio. Posteriormente con estas mismas muestras se procedió a hacer la determinación de humedad gravimétrica del suelo, para lo cual se pesó el suelo con la humedad de campo y luego se secó por 48 h a 105°C (Henríquez y Cabalceta 1999, Radulovich 2009, Topp y Ferré 2002).

Análisis estadístico

Los datos obtenidos a partir de las variables medidas en las 2 profundidades, fueron sometidos al análisis paramétrico o prueba de “t de Student” para el análisis de 2 poblaciones de datos, esto con el fin de determinar la diferencia estadística entre ambos. También se utilizó el análisis de correlación simple de Pearson con el

fin de relacionar las variables evaluadas así como de regresiones lineales simples.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con los resultados de este estudio se encontró un nivel de compactación diferencial, en la cual la superficie del suelo mostró los mayores valores de las variables relacionadas a la compactación que los valores encontrados a los 15 cm (Cuadro 1). Los autores consideran que es importante aclarar que ello es posible aseverarlo y aplicaría solamente para la zona entre-plantas, lugar dentro de la plantación de café que como se mencionó anteriormente, fue en donde se hicieron las evaluaciones para este estudio; ello significa que es factible encontrar valores y tendencias diferentes de las variables evaluadas en otras zonas dentro de la plantación de café, por ejemplo en la zona justo debajo de la planta o bien en la entrecalle, aspectos que no fueron evaluados en este estudio.

Cuadro 1. Promedio y parámetros estadísticos de la resistencia a la penetración y al corte, densidad aparente, humedad gravimétrica y temperatura, medida a 2 profundidades de suelo en la zona entre plantas de una plantación de café, en Juan Viñas, Costa Rica.

Variable	Dif	Prof.	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	%Variación
Resistencia a la penetración (MPa)–Chatillon-	**	0	1,60	2,73	0,80	0,68	42,14
		15	0,73	1,14	0,34	0,28	38,88
Resistencia a la penetración (Mpa)-Soil Test-	**	0	0,30	0,51	0,15	0,10	34,16
		15	0,15	0,29	0,05	0,07	48,07
Resistencia al corte tangencial (MPa)		0	0,028	0,039	0,020	0,008	27,06
		15	0,025	0,034	0,015	0,007	28,28
Densidad aparente (Mg.m ⁻³)		0	0,98	1,10	0,91	0,05	5,58
		15	0,93	1,08	0,81	0,09	9,59
Humedad gravimétrica (%) +	**	0	30,37	33,41	28,66	1,39	4,57
		15	41,08	45,03	36,92	2,76	6,73
Temperatura (°C)		0	24,42	25,40	23,40	0,64	2,61
		15	24,79	25,10	24,30	0,30	1,20

** diferencias significativa a p menor a 0,01 entre las medias de 2 poblaciones según la prueba de “t de student”.

+ el valor de humedad de Capacidad de Campo fue de 35,8% de humedad gravimétrica, datos no publicados.

Resistencia a la penetración y al corte tangencial

A pesar de que los valores absolutos de la resistencia a la penetración medida con los 2 tipos de penetrómetros fueron diferentes entre sí, se encontró una tendencia similar entre ambos aparatos; esto es, en ambos se encontró que el valor encontrado en la superficie casi duplicó el valor obtenido a los 15 cm. Los valores de resistencia a la penetración en la superficie fueron de 1,60 y 0,30 MPa con el tipo de penetrómetro “Chatillón” y “Soil-Test” respectivamente, en tanto que los obtenidos a 15 cm fueron de 0,73 y 0,15 MPa en el mismo orden. Estas diferencias entre las profundidades fueron estadísticamente significativas (Cuadro 1).

La diferencia en los valores absolutos entre los aparatos se podría explicar por la relación que existe entre el diámetro del pistón y la resistencia interna del resorte. Según Forstythe (1985), estudios previos han demostrado que el penetrómetro de pistón tipo “Chatillón” ha sido muy apropiado para representar la variaciones en la resistencia a la penetración de los suelos y ha sido igualmente el más utilizado en estudios en Costa Rica; Forsythe et al. (2005) determinaron como un valor crítico de resistencia a la penetración para el rendimiento en el cultivo de maíz, un valor de 2,75 MPa. El mismo autor también reporta el

valor de 2,96 MPa como valor limitante para el crecimiento de las raíces (Forsythe 1985).

Esta tendencia de mayores valores de resistencia a la penetración en las capas superficiales del suelo, ha sido encontrado por otros investigadores principalmente en sistemas de pastoreo. Forsythe et al. (2005) menciona el efecto de la compactación superficial en áreas dedicadas a la explotación ganadera así como el apareamiento de encharcamiento y apareamiento de coloraciones grises (gleización) lo cual es evidencia de mala infiltración y de procesos de reducción en el suelo. Stankoviocova et al. (2008) evaluaron la resistencia a la penetración en pasturas bajo 3 diferentes sistemas y encontraron los mayores valores entre 0,09 y 0,33 m con valores que oscilaron entre 3,78 y 3,81 MPa con una tendencia a la disminución de la variable al aumentar la profundidad.

Por otro lado, al relacionar las lecturas de ambos aparatos entre sí, se obtuvo una relación directamente proporcional y altamente significativa (r de 0,65) la cual puede observarse en la Figura 4.

Guillén et al. (2006) encontraron valores menores de resistencia a la penetración aún en los meses de menor precipitación con valores promedio de 0,2 MPa. Reportan en su estudio una relación inversa entre la resistencia a la

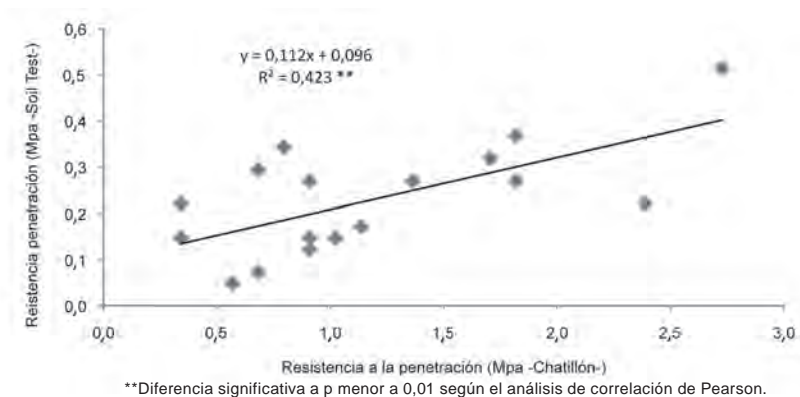


Fig. 4. Relación entre la resistencia obtenida entre el penetrómetro Chantillón y Soil Test en mediciones realizadas en la zona entre plantas de una plantación de café, en Juan Viñas, Costa Rica.

penetración y la cantidad de colémbolos en el suelo de este cultivo.

En relación con la resistencia al corte, los valores guardaron la misma tendencia que la resistencia a la penetración. En la superficie se determinó un valor de 0,028 MPa y a los 15 cm de 0,025 MPa, pese a ello, estas diferencias no fueron estadísticamente significativas.

Densidad aparente

En concordancia con la tendencia obtenida con los datos de las variables de resistencia a la penetración y al corte, se encontró que la superficie del suelo presentó mayor densidad aparente con un valor promedio de $0,98 \text{ Mg.m}^{-3}$ en tanto que a 15 cm de profundidad se encontró un valor promedio de $0,93 \text{ Mg.m}^{-3}$, valores que sin embargo no fueron estadísticamente diferentes (Cuadro 1).

La similitud encontrada en la tendencia de estas 3 variables (densidad aparente, resistencia al corte y a la penetración), podría explicar el hecho de que la superficie del suelo presenta una compactación diferente a la capa subsuperficial. Esto puede deberse al pisoteo humano que ocurre al llevarse a cabo las prácticas agrícolas que se realizan rutinariamente en el cultivo del café.

Esta tendencia sin embargo, difiere de lo reportado por Alvarado y Forsythe (2005) para otros cultivos y quienes encontraron que los valores de densidad aparente, aumentaron con la profundidad al tiempo que reportan un amplio ámbito de variación ($0,53$ a $2,00 \text{ Mg.m}^{-3}$). Forsythe y Schwiezer (2001) por otro lado, reportan que cuando la condición del suelo no permite la penetración de raíces de la planta, los valores de densidad aparente variaron desde $1,09 \text{ Mg.m}^{-3}$ para un Andisol a $1,8 \text{ Mg.m}^{-3}$ para un suelo aluvial. Para el caso de este estudio, los valores de densidad aparente encontrados fueron menores de 1 Mg.m^{-3} , lo que sugiere también la influencia de cenizas volcánicas en la génesis de estos suelos, debido a su cercanía a los volcanes Irazú y Turrialba.

En la Figura 5 se muestra la relación encontrada entre la resistencia a la penetración (con el penetrómetro tipo Chatillón) y la densidad aparente (r de 0,41). Como se observa, la relación fue directamente proporcional comportamiento que concuerda con el hecho de que ambas variables son utilizadas como índices de diagnóstico para problemas de compactación (Forsythe 1985).

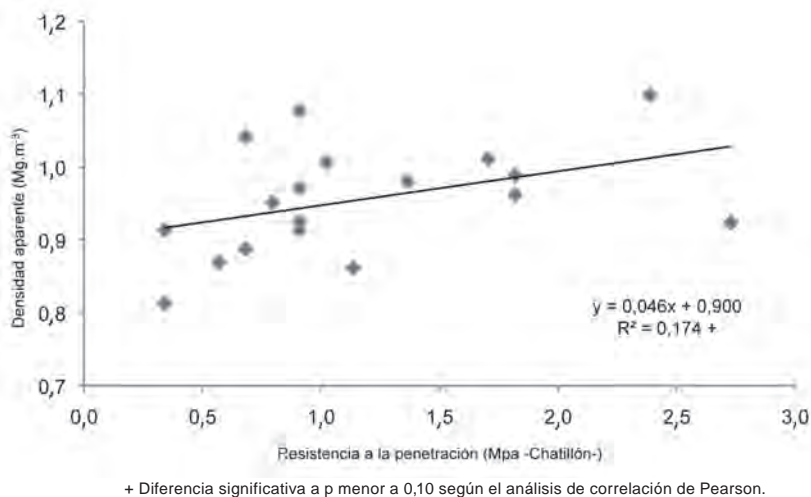


Fig. 5. Relación entre la resistencia a la penetración con el penetrómetro tipo Chantillón y la densidad aparente medida en la zona entre-plantas en una plantación de café, Juan Viñas, Costa Rica.

Temperatura y humedad

En relación con la temperatura, no se encontró diferencia estadística entre ambas profundidades (24,42 y 24,79°C en la superficie y a 15 cm respectivamente, Cuadro 1). Se encontró un ámbito amplio entre el valor mínimo y máximo en la superficie (Figura 6); este comportamiento puede obedecer al efecto de calentamiento y enfriamiento en una forma más drástica, en tanto que al aumentar la profundidad este efecto disminuye sustancialmente ya que provoca menor variación entre las temperaturas máximas y mínimas (Porta et al. 2003). Guillén et al. (2006) encontró que para el cultivo del café, se presenta muy poca variación de la temperatura de la superficie del suelo a través del año y reporta

datos cercanos a 20°C, valores menores que los encontrados en este estudio. En suelos de Turrialba por otro lado, Forsythe (2002) reporta un valor promedio dentro de los 50 cm de profundidad de 25,4°C que se clasifica con ello, en el régimen de temperatura como isohipertérmico. Este mismo autor encontró menores temperaturas a mayor profundidad, debido a una advección de agua fría causada por la penetración del agua de lluvia. Este último aspecto concuerda con lo encontrado en este estudio en relación con el agua del suelo, debido a que a los 15 cm se encontró mayor contenido de humedad gravimétrica (42,08%) que en la superficie (30,37%), valores cercanos a 35% que es la que correspondió a la condición de Capacidad de Campo.

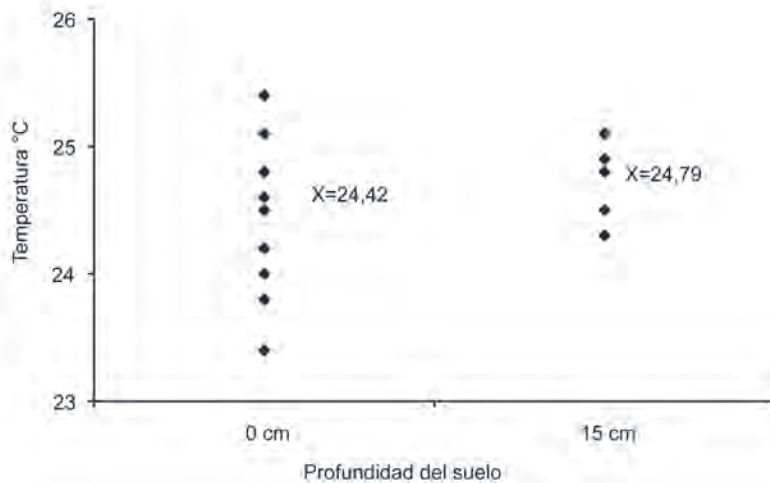


Fig. 6. Variación de la temperatura a 2 profundidades de suelo medida la zona entre-plantas en una plantación de café, Juan Viñas, Costa Rica.

Correlación entre variables

Al correlacionar las variables determinadas en este estudio, se encontró que los valores de los 2 penetrómetros correlacionaron positivamente (0,65) y en forma altamente significativa, datos que se presentan en el Cuadro 2 y que se

presentaron anteriormente en forma gráfica en la Figura 4. Aunque los valores absolutos obtenidos en cada tipo de aparato fueron diferentes, ambos guardaron cierto grado de proporcionalidad ya que miden esta propiedad del suelo bajo el mismo fundamento.

Cuadro 2. Correlación simple de Pearson entre las variables evaluadas en la zona entre plantas de una plantación de café, en Juan Viñas, Costa Rica.

	R.R. "Cha"	R.R. "ST"	R.C.T.	Den. Apar.		Humedad		
Temp.	-0,15	0,05	-0,18	0,42	+	-0,33		
R.R. "Cha"	-	0,65	**	0,21	-0,69	**	0,41	+
R.R. "ST"		-		0,04	-0,59	**	-0,03	
R.C.T.			-	-0,23			0,37	
Den. Apar.				-			-0,46	*

Temp: Temperatura en grados centígrados.

R.R. "Cha": Resistencia a la penetración con el penetrómetro "Chatillón" (MPa).

R.R. "ST": Resistencia a la penetración con el penetrómetro Soil Test (MPa).

R.C.T.: Resistencia al corte tangencial (MPa).

Den. Apar.: Densidad aparente ($Mg.m^{-3}$).

Humedad: Humedad gravimétrica (%).

+Diferencia significativa a p menor a 0,10; análisis de correlación de Pearson.

*Diferencia significativa a p menor a 0,050; análisis de correlación de Pearson.

**Diferencia significativa a p menor a 0,01; análisis de correlación de Pearson.

Se encontró igualmente una relación inversa y altamente significativa entre los valores de ambos penetrómetros y la densidad aparente del suelo, ya que se presenta más alta con el penetrómetro tipo "Chatillón" (-0,69**), que apoya lo sugerido por Forsythe (1985) en cuanto a que este tipo de aparato representa mejor las propiedades mecánicas del suelo desde un punto de vista agrícola. Otra relación que se encontró fue entre la densidad aparente y la humedad del suelo, la cual fue inversa (-0,46*).

CONCLUSIÓN

La evaluación de las propiedades físicas del suelo con la utilización de metodologías y determinaciones rápidas de campo, es una práctica que debe ser implementada en forma más rutinaria con el fin de aumentar la cantidad de datos disponibles a nivel nacional. Particularmente la compactación del suelo, es una manifestación negativa que tiene un impacto relevante en la producción agrícola así como en otros aspectos como por ejemplo la dinámica de infiltración del agua en el suelo en los sistemas agroproductivos. Su determinación rápida así como de otras

propiedades del suelo, puede facilitar sin duda la evaluación de la productividad de los suelos a nivel de las fincas y su posible impacto a nivel ambiental.

AGRADECIMIENTO

A la compañía Hacienda Juan Viñas por su permanente disposición y aporte al desarrollo de la investigación y la docencia en el área agrícola.

LITERATURA CITADA

- AGÜERO J.M., ALVARADO A. 1983. Compactación y compactabilidad de suelos agrícolas y ganaderos de Guanacaste, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 7(1/2):27-33.
- ALVARADO A., FORSYTHE W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(1):85-94.
- BENGOUGH A.G., MULLINS C.E. 1991. Penetrometer resistance, root penetration resistance and root elongation rate in two Sandy soils. *Plant and Soil*. 131(1):59-66.
- FORSYTHE W. 1986. Manual de laboratorio. Física de suelos. IICA. San José, Costa Rica. 212 p.

- FORSYTHE W., SCHWEIZER S. 2001. La resistencia a la penetración y la rata de infiltración como indicadores de las condiciones físicas de un suelo de Costa Rica. In: Memorias del XV Congreso Latinoamericano y V Cubano de la Ciencia del Suelo Varadero, 11 al 16 de noviembre, 2001.
- FORSYTHE W. 2002. Parámetros ambientales que afectan la temperatura del suelo en Turrialba, Costa Rica y sus consecuencias para la producción de cultivos. *Agronomía Costarricense*. 26(1):43-62.
- FORSYTHE W., SANCHO F., VILLATORO M. 2005. Efecto de la compactación de los suelos sobre el rendimiento de maíz en tres localidades de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3):175-185.
- GAVANDE S.A. 1979. Física de suelos: principios y aplicaciones. 1 ed. México, Limusa. 135 p.
- GUILLÉN C., SOTO-ADAMES F., SPRINGER M. 2006. Variables físicas, químicas y biológicas del suelo sobre las poblaciones de colémbolos en Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30(2):19-29.
- HENRÍQUEZ C., CABALCETA G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque Agrícola. ACCS. 1 ed. San José, Costa Rica. 111 p.
- PORTA C.J., LÓPEZ-ACEVEDO R.M., ROQUERO D.C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. Ediciones Mundi Prensa. España. 3ª ed. 929 p.
- RADULOVICH R. 2009. Método gravimétrico para determinar in situ a humedad volumétrica del suelo. *Agronomía Costarricense* 33(1):121-124.
- SOIL SURVEY STAFF. 2010. Keys of soil taxonomy. Eleventh edition. United States Department of Agriculture. 338 p.
- TOPP G.C., FERRÉ P.A. 2002. Thermogravimetric determinations using convective oven-drying, pp. 422-424. In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds). Methods of soil analysis. part 4, physical methods. Soil Science Society of America, Inc. Madison.
- STANKOVIČOVÁ K., NOVÁK J., BAJLA J., CHLPÍK J. 2008. Penetration resistance of soil on the year-long using mountainin pasture by the cattle. *Journal Central European Agriculture* 9(2):311-316.
- VEIHMEYER F.J., HENDRICKSON A.H. 1948. Soil density and root penetration. *Soil science* 65:487-493.