



C1P63. EL USO DEL TEST DE PROCTOR PARA LA REDUCCIÓN DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO

Vázquez, Juan Manuel^{1,2*}, Reposo, Gisela¹; Rojo, Veronica¹; Martínez, Maximiliano¹; Matilde Mur² y Guecaimburú, Juan Martín¹

¹ Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján.

² Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.

*Departamento de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Ruta 5 y Constitución, Luján, Buenos Aires, Argentina (CP 6700). juanmvaz@hotmail.com

RESUMEN

El test de Proctor permite determinar la máxima densidad aparente a la que se compacta un suelo y a que contenido de humedad se alcanza. Ese nivel de compactación corresponde a una energía específica aplicada mediante una serie de impactos de un pistón de 2,5 kg. La máxima densidad aparente y la humedad crítica varían si se modifica la intensidad de compactación del test de Proctor, pudiendo coincidir con la compactación producida a campo por diferentes intensidades de tráfico agrícola. El objetivo de este trabajo fue evaluar la posibilidad de predecir el nivel de compactación que producen diferentes condiciones de tráfico agrícola, variando el número de impactos del test de Proctor. Se tomaron muestras de suelo de las huellas de tres tractores de diferentes pesos a cuatro contenidos diferentes de humedad del suelo. En el mismo sitio se realizó el test de Proctor con 15, 25 y 35 golpes de pistón, con cinco contenidos de agua. Se trazaron las diferentes curvas de compactación del suelo, despejando los valores de máxima densidad aparente y contenido de humedad crítico para cada curva. Los resultados muestran que variando la energía de compactación Proctor con el número de golpes, los valores de densidad aparente máxima se encontraban muy por encima de los valores de densidad aparente medidos a campo bajo tráfico agrícola, por lo que la modificación del número de golpes del test de Proctor no permite predecir la compactación generada por el tráfico agrícola. Por otra parte la humedad crítica Proctor se encontró en torno al 60% de la humedad crítica de las curvas de compactación a campo. Por tal motivo las operaciones de la maquinaria agrícola podrían realizarse con contenidos de humedad superiores a la humedad crítica Proctor.

Palabras claves: humedad crítica, máxima densidad aparente, saturación del suelo.

INTRODUCCIÓN

La compactación del suelo se produce por el incremento de la densidad aparente al aplicar una fuerza mecánica al suelo (Soil Science Society of America, 2008). Cuando se produce por el tráfico agrícola, depende de una serie de factores edáficos como el contenido de humedad, la materia orgánica, la textura y también de factores relacionados al tráfico como el peso del tractor, la presión en el área de contacto rueda del suelo y el número de pasadas del tractor (Alakuku 1997). Entre los factores edáficos, el contenido de humedad del suelo es el factor más importante que influye en los procesos de compactación del suelo (Soane & Van Ouwerkerk 1994) y es el único que se puede manejar en el corto plazo para reducir la compactación del suelo. El conocimiento de la relación entre la humedad del suelo y la compactación es crucial para los agricultores porque les ayuda a programar operaciones mecanizadas de acuerdo al contenido de humedad adecuado (Olu *et al.*, 1989). Esta relación se define mediante el test Proctor que es un procedimiento ampliamente aceptado para estudiar la susceptibilidad a la compactación de los suelos, bajo una carga dinámica estandarizada en un rango de contenidos de humedad del suelo (Aragón *et al.*, 2000). Esta prueba que originalmente fue desarrollada en ingeniería civil (Proctor, 1933), ha sido ampliamente adoptada en la agricultura. En el test de Proctor, se obtiene una curva de densidad aparente a la que se compacta un suelo en función del contenido de agua del suelo, de la que se despeja la máxima densidad aparente de la curva y el contenido de humedad del suelo al que se obtiene. Este último se conoce como contenido de humedad óptimo de compactación, aunque en las ciencias agrarias se lo suele denominar "contenido de humedad crítico", porque la compactación del suelo no es deseable (Etana *et al.*, 1997, Mapfumo & Chanasyk, 1998).

La máxima densidad aparente de compactación es útil para caracterizar la relación entre el rendimiento de los cultivos y la compactación del suelo. En tal sentido se ha definido el parámetro "densidad aparente relativa" que expresa la densidad aparente medida a campo como un porcentaje de la máxima densidad aparente del mismo suelo (Hakansson



& Lipiec, 2000). Carter (1990) encontró que los rendimientos máximos de los cultivos se obtuvieron en un rango de 80 a 90% de densidad aparente relativa.

La humedad crítica de compactación delimita dos rangos de humedad: el primero a contenidos inferiores a esta humedad, la cohesión y fricción entre partículas limitan la compactación del suelo a valores de densidad aparente inferiores a la densidad máxima. La densidad aparente será menor cuanto más seco se encuentre el suelo. En el segundo rango cuando el contenido de humedad supera la humedad crítica de compactación, la reducción de la resistencia interna del suelo (cohesión y fricción entre partículas), permite que el colapso de los poros que contienen aire, llevando el suelo casi a saturación durante el proceso de compactación (no llega al 100% de saturación porque queda aire atrapado). Cuanto mayor sea el contenido de humedad, menor será el espacio poroso con aire que colapsa y por lo tanto menor será la densidad aparente alcanzada durante la compactación (Vázquez, 2011). Si bien varios autores recomiendan evitar traficar el suelo a la humedad crítica para evitar alcanzar la máxima densidad aparente (Mapfumo & Chanasyk 1998, Botta *et al.*, 2004), el tráfico debería limitarse a contenidos de humedad inferiores a esta última, ya que cuando el suelo se compacta con una humedad mayor a la crítica, se eliminan agregados, se eliminan grandes espacios vacíos entre estos, y se genera una reorientación preferencial de las partículas de arcilla, resultando todo esto en una reducción de la permeabilidad (Benson & Trast, 1995).

De todos modos la humedad crítica a partir de la cual se debería evitar el tráfico agrícola, debería ser determinada para cada condición de tránsito. Si la fuerza de compactación aplicada por el pasaje de un tractor fuera inferior a la del test de Proctor, la curva de compactación en función de la humedad se desplaza hacia abajo y hacia la derecha, con una "densidad máxima" más baja, alcanzable a valores superiores de "humedad crítica" (Hillel, 1998). Esto difiere en parte con Raghavan *et al.* (1977), que encontraron diferentes curvas de densidad aparente en función del contenido de humedad del suelo, para diferentes presiones de contacto del tractor del suelo y aunque en todas esas curvas los valores de densidad aparente aumentaban con la presión de compactación, el contenido de humedad crítico permanecía relativamente invariable.

Con el objeto de determinar la curva de compactación para cada condición de tráfico, varios autores vincularon los valores de densidad aparente medidos a campo bajo tráfico agrícola, con los hallados en laboratorio mediante el test de Proctor. Raghavan & Ohu (1985), citados por Adekalu *et al.*, (2007), realizaron el test de Proctor variando el número de golpes: 5, 15 y 25. Establecieron que la densidad lograda luego de 5 golpes corresponde a "la condición normal del suelo", 15 golpes corresponden a la compactación generada por el paso de un tractor de "tamaño medio" y 25 golpes corresponden al paso de un tractor "pesado". Froehlich *et al.*, (1980) citados por Johnson *et al.* (2007), sostienen que el test de Proctor genera demasiada energía de compactación, en comparación con los tractores (en este caso tractores forestales), por lo que propusieron una modificación del test de Proctor (10 golpes de una masa de 0,5 kg que cae desde 30,5 cm), que genere un grado de compactación similar al que provocan los tractores mencionados. Hamza *et al.* 2011, encontraron que la densidad aparente del suelo bajo la carga de un tractor, aumentó con el contenido de agua (de 2 a 22%) y con el aumento de la carga externa, pero no encontraron un contenido crítico de agua en el que la densidad comienza a disminuir con mayores contenidos de agua.

El objetivo de este estudio fue determinar la relación entre la compactación producida por el tráfico agrícola y la generada por el test de Proctor. La hipótesis de este estudio fue que la compactación del suelo producida por diferentes condiciones de tráfico agrícola podría predecirse variando la energía de compactación del test de Proctor.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio del ensayo

Las mediciones de campo y los muestreos se realizaron en el partido de San Andrés de Giles, en el norte de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, a 34°26' S 59°28' O; altitud 52 m sobre el nivel del mar. El suelo era un Argiudol Típico arcilloso, ilícito, térmico, fino (Servicio de Conservación de Suelos, 1994), manejado en siembra directa.

Curvas de compactación en laboratorio

Para la obtención de la curva del test de Proctor estándar (ASTM, 1992), se tomaron 45 muestras de suelo del sitio del ensayo, de aproximadamente 2,5 kg. Estas fueron secadas al aire para luego humedecerlas pulverizándolas con agua en bolsas de plástico con el fin de alcanzar cinco contenidos de agua diferentes. Las muestras permanecieron en bolsas durante 24 hs para homogeneizar el contenido de humedad. Cada muestra se compactó en tres capas superpuestas

en una cámara de compactación $0,911 \times 10^{-3} \text{ m}^3$. Cada capa recibió 25 golpes de un pistón de 2,5 kg cayendo desde 0,305 m de altura. La energía de compactación fue de $593,7 \text{ kJm}^{-3}$. Se determinó el peso húmedo del suelo compactado en la cámara. Luego, las muestras se secaron en un horno a 105°C hasta peso constante para estimar el contenido de humedad y la densidad aparente seca. El mismo procedimiento se repitió para 15 y 35 golpes de pistón por capa para obtener dos curvas de compactación por encima y por debajo de la del test de Proctor.

Curvas de compactación a campo

Se generaron tres intensidades de compactación con cuatro contenidos de humedad para obtener tres curvas de densidad aparente en función de la humedad del suelo a campo.

Para las intensidades de compactación se usaron tractores de diferentes pesos para compactar un suelo a cuatro diferentes contenidos de agua del suelo. El suelo se compactó con el pasaje de una rueda de cada tractor, evitando mezclar el efecto de las ruedas tractoras delanteras y traseras de diferente tamaño y diferente peso. Para las cargas más pesadas y medianas, los tractores fueron Deutz Agco Allis 6175 (171 CV) y FIAT 700 (70 CV) respectivamente y en ambos casos el tratamiento de compactación se realizó con el eje trasero. Para el Deutz Agco Allis 6175, la carga era de 3010 kg / rueda y el neumático era un 24.5-32. En el caso del FIAT 700, la carga era de 1565 kg / rueda y el neumático era de 18.4-30. Debido a la falta de un tractor más ligero, se utilizó el eje delantero de un Deutz Fahr Ax 4145 (145 CV) para aplicar el tratamiento de compactación ligera. En ese caso, la carga del eje delantero era 1210 kg / rueda y el neumático usado era 12.4-28.

Para crear los diferentes contenidos de humedad del suelo, se montaron cuatro parcelas de 3 x 2 metros con un borde alrededor que permitió llenarlos con agua hasta que la capa superior del suelo estuviera saturada. Luego, cada parcela se compactó en días diferentes a medida que disminuyó el contenido de humedad del suelo. Cada parcela recibió los tres tratamientos de compactación.

Parámetros relevados

Se recogieron 15 muestras de suelo no alteradas con cilindros 6.9 cm de diámetro por 6.0 cm de longitud. Las muestras se tomaron a una profundidad de 0-10 cm debajo del centro de las huellas de las ruedas. Se secaron en estufa a 105°C hasta peso constante para determinar el contenido de humedad del suelo y las masas secas con una precisión de 0,01 g. La densidad aparente seca se calculó usando masa de suelo seco muestreada en el campo y volumen de las muestras.

El área de contacto con el suelo del neumático se midió arrojando talco alrededor del neumático sobre el suelo. Después de mover el tractor, se tomó una imagen del área dentro del borde del talco con una escala y el área se calculó en una computadora (figura 1).



Figura 1: área de contacto rueda suelo marcada con talco.

Diseño experimental y análisis estadístico

El diseño experimental fue un diseño de bloques completamente aleatorizados. Con los resultados se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) y el test de comparaciones múltiples de Duncan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El diferente número de golpes en la prueba de Proctor generó diferentes curvas de compactación que se desplazaron hacia arriba y hacia la izquierda en la medida que aumentaba la energía de compactación, alcanzando mayores valores de densidad aparente a menores contenido de humedad en coincidencia con lo planteado por Hillel (1998) y contrastando con Raghavan *et al.*, (1977) que encontraron el mismo contenido de humedad crítico para diferentes energías de compactación (Tabla 1). En la figura 2 se observa que con contenidos de humedad superiores a la humedad crítica de cada curva, la densidad aparente coincide con un grado de saturación en torno del 80%, sin llegar a la completa saturación durante el proceso de compactación lo que indica la permanencia de aire entrampado dentro del suelo.

Tabla 1: Parámetros del test de Proctor (*Test de Proctor estandar).

Golpes por capa	Densidad aparente máxima (gr/cm ³)	Contenido de humedad crítica (%)
15	1,53	18
25*	1,57	17
35	1,64	15

La Tabla 2 muestra que cuando el suelo fue compactado por las ruedas del tractor, las cargas medias y pesadas fueron 48% y 98% más altas que la carga ligera. También hubo una gran diferencia en el área de contacto del suelo de la llanta, pero los valores de la presión en el área de contacto rueda suelo fueron valores relativamente similares (14% de variación). El hecho de que la densidad aparente obtenida bajo el tráfico agrícola casi no presentó diferencias significativas entre los tratamientos de compactación (tabla 3), refuerza el hecho de que la compactación superficial depende de la presión en el área de contacto rueda suelo. La única excepción fue para el contenido de agua del suelo más bajo, en el cual el tratamiento de compactación con la presión más baja fue diferente de los demás.

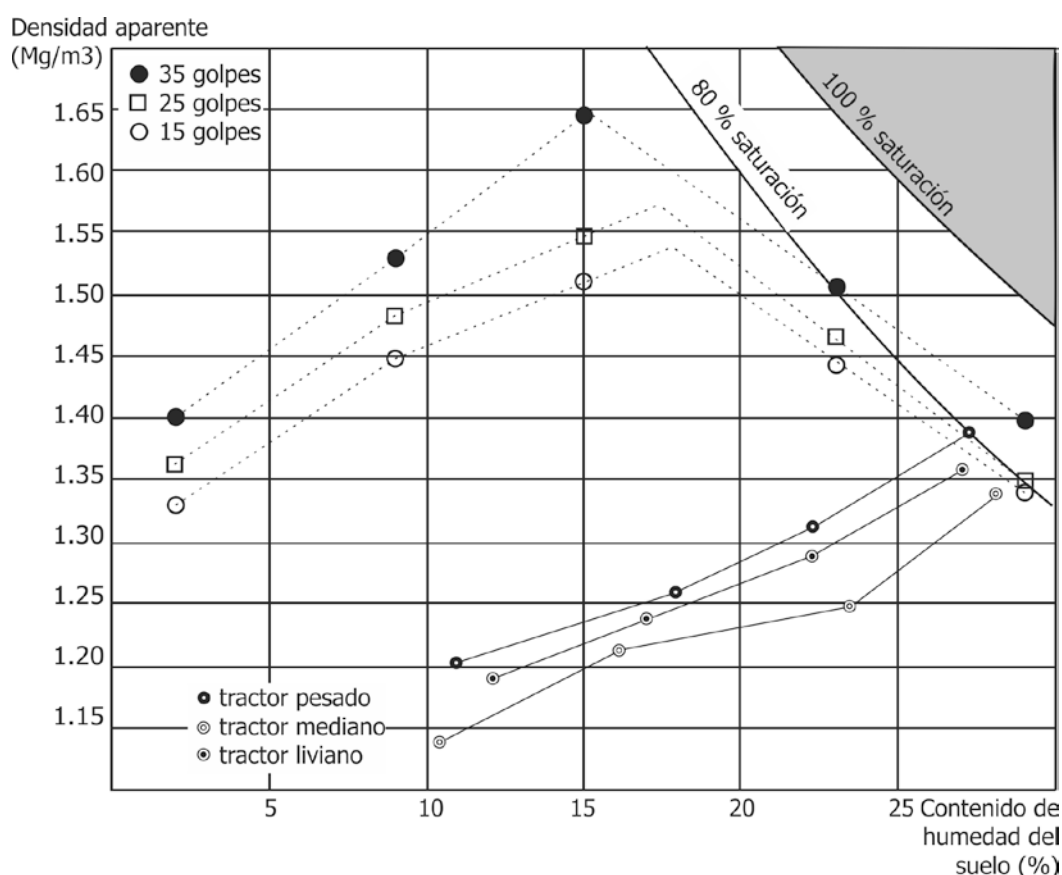


Figura 2: Diferentes curvas de densidad aparente de compactación, obtenidas con el test de Proctor y en el campo bajo tráfico agrícola.



Tabla 2: Parámetros vinculados al tractor que condicionan la compactación.

Peso/rueda (Kg)	Área de contacto rueda suelo (cm ²)	Presión en el área rueda suelo (Kg/cm ²)
1210	900	1,34
1565	1300	1,20
3010	2200	1,37

Tabla 3: Valores de densidad aparente para tres tratamientos de compactación a cuatro contenidos de humedad del suelo.

	Humedad 1	Humedad 2	Humedad 3	Humedad 4
Tractor pesado	1,20 a	1,26 a	1,31 a	1,38 a
Tractor mediano	1,14 b	1,21 a	1,25 a	1,33 a
Tractor liviano	1,19 a	1,23 a	1,28 a	1,35 a

Letras diferentes en sentido vertical muestran diferencias significativas ($P < 0.05$ Duncan).

Mientras que para el suelo del ensayo la máxima densidad aparente Proctor fue de 1,57 g/cm³, el suelo bajo el tráfico agrícola no alcanzó al 90% de ese valor (1,33-1,38 g cm⁻³ es la máxima densidad aparente a campo, obtenida entre 27 a 28% del contenido de humedad del suelo). Si se considera que Carter (1990) encontraba los máximos rendimientos de cereales de invierno en un rango de 80-90% de compactación relativa, se puede observar en la figura 2 que ese porcentaje de compactación se sitúa entre las humedades críticas de las curvas del test de Proctor (17%) y las curvas de campo (28%). Por lo tanto no sería adecuado tomar la humedad crítica Proctor como valor de referencia de a partir de que humedad limitar el tráfico agrícola y sería recomendable para tal fin determinar la humedad crítica campo para cada situación de tráfico agrícola. Se debe descartar la posibilidad de utilizar una variante del test de Proctor que relacione la cantidad de golpes del ensayo con la presión en el área de contacto rueda suelo durante la compactación, porque la reducción del 40% de la energía de compactación de la prueba Proctor, al reducir de 25 a 15 golpes, solo permitió que el contenido de humedad crítico Proctor se acercara a la humedad crítica de campo en un 10% (figura 2), contradiciendo a Adekalu *et al.*, (2007) que sostiene que reduciendo a 15 golpes la energía de compactación del test de Proctor se iguala la compactación de un tractor mediano. Queda por lo tanto evaluar la modificación del test de Proctor reduciendo la masa del pistón de compactación de acuerdo a la propuesta de Froehlich *et al.*, (1980). La posibilidad de determinar en laboratorio a qué humedad se comienza a saturar el suelo para cada situación de tránsito, permitiría gestionar el tráfico agrícola por debajo de este umbral de conservando la estructura del suelo sin provocar una reducción de la permeabilidad como sostienen Benson & Trast, (1995).

CONCLUSIONES

Dentro de los límites de las condiciones del ensayo se puede concluir que los tractores de ruedas tienen presentadas curvas de densidad aparente en función del contenido de humedad del suelo inferiores a las del test de Proctor, con un mayor contenido de humedad crítico. Por lo tanto los tractores agrícolas podrán transitar sobre el suelo a contenidos de humedad superiores a la humedad crítica de Proctor sin llevarlo a saturación. Para determinar hasta qué valor de humedad del suelo se extiende esta condición para cada tipo de tractor, sería necesario desarrollar una variante del test de Proctor de menor energía de compactación, ya que reduciendo la cantidad de golpes de compactación del test, el grado de compactación alcanzado continúa siendo más elevado que el que genera el tráfico de los tractores a campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Adekalu, K.O.; DA Okunade & JA Osunbitan. 2007. Estimating trafficability of three Nigerian agricultural soils from shear strength-density-moisture relations. *Int. Agrophysics*, 21, 1-5.
- Alakukku L. 1997. Long Term soil compaction due to high axle load traffic. Ed. Agricultural Research Centre of Finland. Jokioinen, Finland, 55p.
- Aragón, A.; MG García; RR Filgueira & A Pachepsky. 2000. Maximum compactibility of Argentine soils from the Proctor test. The relationship with organic carbon and water content. *Soil Till. Res.* 56, 197-204.
- ASTM, 1992. Annual Book of ASTM Standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA.
- Botta, G.F.; JM Vazquez; A Tolón Becerra; R Balbuena & S Stadler. 2012. Soil compaction distribution under land clearing in calden (Prosopis Caldenia Burkart) forest in Argentinean pampas. *Soil Till. Res.* 119, 70-75.



- Carter, M.R.1990. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. Can. J. Soil Sci. 70, 425±433.
- Etana, A.; RA Comia & I Hakansson. 1997. Effects of uniaxial stress on the physical properties of four Swedish soils. Soil Till. Res. 44, 13-21.
- Hakansson, I. & L Lipiec. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. Soil Till. Res. 53, 71-85.
- Hamza, M.A.; SS Al Adawi & SS Al Hinai. 2011. Effect of combined soil water and external load on soil compaction. Soil Research, 2011, 49, 135-142.
- Froehlich, H.A.; J Azevedo; P Cafferata & D Lysne. 1980. Predicting soil compaction on forest land. Forest Engineering Department. Oregon State University.
- Hillel, D., 1998. Environmental soil physics. Academic Press, San Diego, CA.
- Mapfumo, E. & DS Chanasyk. 1998. Guidelines for safe trafficking and cultivation, and resistance-density-water relations of three disturbed soils from Alberta. Soil Till. Res. 46, 193-202.)
- Ohu JO; OA Folorunso; FA Aeiniji & GSV Raghavan GSV. 1989. Critical moisture content as an index of compactibility of agricultural soils in Borno State of Nigeria. Soil Tech 2, 211–219.
- Proctor, R. R. 1933. Fundamental principles of soil compaction. *Engineering News Record*, 111(9), 245-248.
- Raghavan, GSV; E McKyes & B Beaulieu. 1977. Prediction of clay soil compaction, J. Terramechs. 4, 31-38.
- Raghavan, GSV & JO Ohu. 1985. Prediction of static equivalent pressure of Proctor compaction blows. Trans. ASAE, 28, 1398-1400.
- Soane BD & CVan Ouwerkerk (Eds) (1994) 'Soil compaction in crop production. Developments in Agricultural Engineering Series, Vol. 11.' (Elsevier Science: Amsterdam, The Netherlands)
- Soil Conservation Service, 1994. Keys to Soil Taxonomy, 6th ed. Soil Survey Staff, USDA, Washington, DC, USA.
- Vázquez, J.M. 2011. Compactación del suelo durante el desmonte de Caldén (*Prosopis Caldenia* L.). MSc. Tesis, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, La Plata, Argentina.