

Compactación de un Vertisol debido al tránsito y diferentes masas de tractores agrícolas*

Compaction of a Vertisol due to transit and different weight of tractors

Francisco Gutiérrez Rodríguez^{1§}, Víctor Manuel Vaca García², Edgar Jesús Morales Rosales¹, Andrés González Huerta¹, Delfina de Jesús Pérez López¹ y Pedro Saldívar Iglesias¹

¹Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento. Facultad de Ciencias Agrícolas-Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario "El Cerrillo", El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. C. P. 50200. Tel: 722 296 5529. (ejmoralesr@uaemex.mx; agonzalezh@uaemex.mx; djperezl@uaemex.mx; psaldivari@yahoo.com.mx). ²Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales-Universidad Autónoma del Estado de México. Centro Universitario "El Cerrillo", El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México. C. P. 50090. Tel: (722) 296 6574. (vic.charger@gmail.com). [§]Autor para correspondencia: fgrfca@hotmail.com.

Resumen

La compactación del suelo es una de las áreas más importantes de la investigación para la protección del ambiente a nivel mundial. Los problemas de compactación del suelo se presentan con mucha frecuencia en áreas donde se tiene una mecanización agrícola extensiva e intensiva. Al respecto, esta investigación tiene como objetivo determinar el grado de compactación producido por el tránsito de tractores con diferentes sistemas de rodaje, masas e inflado de sus neumáticos, en un Vertisol. Para tal efecto se probaron tres tipos de tránsito rodado (3, 5 y 10 pasadas de tractores con diferentes masas). La presión media específica de uno de los tractores originó un aumento en el grado de compactación del suelo pero, a partir de las 5 pasadas de tránsito, el impacto fue mínimo. El tractor con fórmula 4 x 4 en su sistema de rodaje, fue el que menos alteró el grado de compactación en la capa superficial del suelo. Existe una relación lineal entre la presión media específica de los tractores y el aumento del grado de compactación del suelo en la mayoría de las variantes ensayadas.

Palabras clave: humedad del suelo, índice de cono, multiarado.

Abstract

Soil compaction is one of the most important areas of research for environmental protection worldwide. The soil compaction problems occur frequently in areas where we have an extensive and intensive agricultural mechanization. In this regard, this study aims to determine the degree of compaction caused by tractor traffic with different systems of shooting, weight and inflating the tires in a Vertisol. For this purpose three types of road traffic were tested (3, 5 and 10 strokes of tractors with different weights). The specific average pressure of one of the tractors led to an increase in the degree of compaction but, beginning at 5 passes traffic, the impact was minimal. The tractor formula 4 x 4 running on the system least altered the degree of compaction in the topsoil. A linear relationship between the average specific pressure tractors and increasing the degree of compaction in most of the variants tested.

Keywords: cone index, multiplow, soil moisture.

Introduction

Recent trends in agricultural mechanization have led to the development of combine harvesters with weights higher than 16 Mg load on the front axle and tractors with weights

* Recibido: octubre de 2014
Aceptado: febrero de 2015

Introducción

Las recientes tendencias en la mecanización agrícola han conducido al desarrollo de cosechadoras de cereales con masas mayores a 16 Mg de carga en el eje frontal y tractores con pesos en el orden de 200 kN; estas tendencias se presentan en función de buscar conjuntos agrícolas más económicos en sus prestaciones al reducir costos operativos y permitir aumentar la superficie cultivada (Oskoui y Voorhees, 1985; Jorajuría *et al.*, 1997). Como consecuencia de una mayor intensidad de tránsito rodado con esas cargas sobre los ejes, se intensifica la compactación en suelos de cultivo y, por lo tanto, el poco crecimiento del sistema radical de las plantas, además de bajos rendimientos y calidad del agroecosistema (Jung *et al.*, 2010). Adebisi *et al.* (1991), plantean que la compactación puede definirse como la compresión de una masa de suelo hasta lograr un volumen menor, originando, en consecuencia, un incremento en la densidad como resultado de las presiones externas aplicadas. En este sentido, la compactación también puede definirse como el resultado de tensiones generadas por la masa y peso de los vehículos que transitan sobre el suelo, las vibraciones originadas en el motor y el producto del resbalamiento activo de las ruedas motrices sobre el suelo de cultivo. Taylor y Gill (1984), sostienen que la principal fuente de compactación es el tránsito vehicular, que puede originar una disminución en el espacio poroso, así como menor capacidad para retener agua y mayor impedancia para el desarrollo radical (Jorajuría y Draghi, 2000).

Smith y Dickson (1990), indicaron que la compactación de las capas superficiales del suelo está influenciada principalmente, por la presión superficial en la zona de contacto de las ruedas motrices con el suelo, mientras que la compactación subsuperficial, está directamente determinada por el peso de la maquinaria. La compactación superficial está referida a la capa arable u horizonte A, donde se realizan en cada ciclo de cultivo los distintos aflojamientos y preparación de la cama de siembra y a la que se adicionan otras operaciones de cultivo. Este tipo de compactación ocurre con el empleo de conjuntos máquina-tractor de bajo peso y presión sobre suelos en condiciones de alta humedad o sobre suelos con mayor susceptibilidad a la compactación (Botta *et al.*, 1997, 2006; Håkansson y Reeder, 1994). En contraste, la compactación subsuperficial es la que se transmite hasta el subsuelo, a profundidades de 40 cm o más, pudiéndose incrementar, entre otros factores no deseables y que pudieran llegar a ser permanentes: por

on the order of 200 kN; These trends are presented in terms of seeking cheaper agricultural contractors in performance to reduce operating costs and enable increased acreage (Oskoui and Voorhees, 1985; Jorajuría *et al.*, 1997). As a result of the increased traffic intensity with these axle loads, compaction intensifies in cropland and, therefore, the slow growth of the root system of plants, in addition to low yields and quality agroecosystem (Jung *et al.*, 2010). Adebisi *et al.* (1991) suggested that, the compaction compression can be defined as a weight of soil to achieve a smaller volume, causing therefore an increase in density as a result of external pressures applied. In this regard, compaction can also be defined as the result of stresses generated by the weight and weight of the vehicles traveling over the floor, vibration from the engine and the active product of the drive wheels slipping on the ground culture. Taylor and Gill (1984), argued that, the main source of compaction is vehicular traffic, which can cause a decrease in the pore space and lower water holding capacity and increased impedance to root development (Jorajuría and Draghi, 2000).

Smith and Dickson (1990) indicated that, the compaction of the topsoil is influenced mainly by the surface pressure in the contact zone of the drive wheels with soil, while the subsurface compaction is directly determined by the weight of machinery. Surface compaction is referred to the plow layer or horizon, which are performed on each individual crop cycle loosening and preparing the seedbed and other farming operations. This type of compaction occurs with the use of machine-tractor sets low weight and pressure on floors in wet conditions or on soils with increased susceptibility to compaction (Botta *et al.*, 1997; 2006. Håkansson and Reeder, 1994). In contrast, the subsurface compaction is transmitted to the basement at depths of 40 cm or more, could be increased, among other undesirable factors and could become permanent: the effect of weight, power, weight, vibrations, the high value in the air pressure in the tires and slippage.

According to Botta *et al.* (2002), vehicular traffic is primarily responsible induced compaction in soils under no-till production, with the texture and moisture content of the most important aspects regarding the reduction of pore space. In that sense, the investigation established that in clay soils are higher risks compact the soil at levels that limit agricultural production and the higher the persistence of the damage done. The number of times the soil is busy, it is also a determining factor of the induced compaction; bulk density, depth and surface of compacted soil, increase

el efecto del peso, la potencia, la masa, las vibraciones, el elevado valor en la presión del aire en los neumáticos y el resbalamiento.

Según Botta *et al.* (2002), el tránsito vehicular es el principal responsable de la compactación inducida en suelos bajo siembra directa en producción, siendo la textura y el contenido de humedad los aspectos más relevantes con relación a la reducción del espacio poroso. En ese sentido, dicha investigación estableció que en suelos arcillosos son mayores los riesgos de compactar el subsuelo a niveles que limiten la producción agrícola, así como mayor será también la persistencia del daño realizado. El número de veces que el suelo es transitado, también es un factor determinante de la compactación inducida; la densidad aparente, la profundidad y la superficie de suelo compactado, aumentan progresivamente con el número de pasadas de maquinaria agrícola (Jorajuría *et al.*, 1997; Botta *et al.*, 2004). Alakuku (1996), determinó que la compactación inducida por el tránsito vehicular persiste de 3 a 11 años en suelos con porcentajes de arcilla de 6 y 85%, aún con periodos de congelamiento del suelo en profundidad cuando el mismo fue transitado con altas cargas sobre el eje. Draghi *et al.* (2001), determinaron que las intensidades de tránsito rodado utilizadas en el manejo tradicional de monte de frutales en una región de Argentina, induce valores de resistencia a la penetración o índice de cono superiores a 2.2 MPa; este grado de compactación se considera limitante del crecimiento radical (Threadgill, 1982).

Generalmente, los trabajos que estudian los efectos que produce el tránsito rodado sobre los suelos de cultivo se realizan de forma simulada, por lo que la presente investigación se planteó como objetivo, la evaluación *in situ* de los valores del índice de cono y el grado de compactación sobre la huella de las ruedas, en función del número de pasadas de tránsito rodado, en un suelo Vertisol previamente labrado con multiarado en la región del Valle de Toluca.

Material y métodos

Descripción del sitio experimental

El estudio fue realizado durante el periodo enero- febrero de 2011, en un área de 0.25 ha del campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, en Toluca, Estado de México, México

progressively with the number of passes of agricultural machinery (Jorajuría *et al.*, 1997; Botta *et al.*, 2004). Alakuku (1996) determined that, the compaction induced persists vehicular traffic from 3-11 years soils with clay percentages of 6 and 85%, even with periods of freezing soil depth when it was busy with high loads axis. Draghi *et al.* (2001) determined that the road traffic intensities used in the traditional management of forest fruit in a region of Argentina, induces values of penetration resistance or cone index higher than 2.2 MPa; the degree of compaction to be considered limiting of root growth (Threadgill, 1982).

Generally, studies examining effects produced by road traffic on agricultural soils occur simulated, so this research is to target-site evaluation of cone index values and the degree of compaction on the footprint of the wheels, depending on the number of passes of road traffic in a Vertisol previously styled with multiplow in Toluca Valley region.

Materials and methods

Description of the experimental site

The study was conducted during the period January-February 2011, in an area of 0.25 ha of experimental field of the Faculty of Agricultural Sciences of the Autonomous University of the State of Mexico, Toluca, State of Mexico, Mexico (19° 24' 43' north latitude, 99° 41' 40' west latitude 2 609 m). The local climate is classified as temperate sub-humid with summer rains, with annual precipitation range from 800 to 1 500 mm and temperature of 4-14 °C (INEGI, 2009). The soil of the experimental site corresponds to a Vertisol, suborder Uderts, great group Pelluderts and subgroup Entic Pelluderts (according to the "USDA Soil Taxonomy System") belonging to clay loam textural class. The study area was the subject of spatial levelling through laser beam used for planting wheat (*Triticum aestivum* L.) and maize (*Zea mays* L.). The experimental plot was ripping with multiplow object (model M-250) to a depth of 45 cm, prior to the tests of transit and penetration resistance.

Experimental design

The experimental design consisted of an array of randomized complete block with three replications, with split plots. The road traffic was developed by two types of tractors with the following specifications: TM (universal mean tractor, John

(19° 24' 43" latitud norte, 99° 41' 40" latitud oeste 2 609 msnm). El clima de la localidad se clasifica como templado sub-húmedo con lluvias en verano, con un rango anual de precipitación de 800 a 1 500 mm y de temperatura de 4 a 14 °C (INEGI, 2009). El suelo del sitio experimental corresponde a un Vertisol, suborden Uderts, gran grupo Pelluderts y subgrupo Entic Pelluderts (de acuerdo con el "USDA Soil Taxonomy System"), perteneciente a la clase textural migajón arcilloso. El área de estudio fue objeto de nivelación espacial con rayo láser y utilizada para la siembra de trigo (*Triticum aestivum* L.) y maíz (*Zea mays* L.). El lote experimental fue objeto de subsoleo con multiarado (modelo M-250) a una profundidad aproximada de 45 cm, previo a los ensayos de tránsito y resistencia a la penetración.

Diseño experimental

El diseño experimental consistió en un arreglo de bloques completos al azar con tres repeticiones, con parcelas subdivididas. El tránsito rodado fue desarrollado por dos tipos de tractores con las siguientes características técnicas: TM (tractor universal mediano, John Deere® 5715, fórmula 4 x 4), con tracción delantera asistida y cubiertas delanteras 10.0-16.0" y traseras 13.6-38.0" y; TL (tractor universal ligero, John Deere® 2755, fórmula 4 x 2) y cubiertas 15.5-38.0" y 7.5-16.0". Las variantes utilizadas en los tractores fueron: a) aire completo en los neumáticos traseros y delanteros con contrapesos (ACC); b) aire incompleto en los neumáticos traseros y delanteros (50%) con contrapesos (AIC); c) aire completo sin contrapesos (ACS) y; d) aire incompleto (50%) sin contrapesos (AIS). Las intensidades de tránsito consistieron en 3, 5 y 10 pasadas del sistema de rodaje por el mismo sitio en cada una de las variantes descritas con anterioridad, con un régimen de velocidad de desplazamiento de aproximadamente 4 km h⁻¹.

Presión media específica del sistema de rodaje

Para la determinación de la presión media específica sobre el suelo del sistema de rodaje de los tractores, se calculó el área de contacto de las ruedas delanteras y traseras para todas las variantes estudiadas, conforme a la metodología propuesta por Liljedahl *et al.* (1984) (Figura 1).

El área de contacto de cada neumático con el suelo es aproximadamente de forma elíptica y se calcula por medio de la ecuación 1:

$$A \approx 0.78 * a * b \quad 1)$$

Deere® 5715, fórmula 4 x 4), with power front wheel drive and front covers 10.0-16.0 "and rear 13.6-38.0" and; TL (light universal tractor, John Deere® 2755, fórmula 4 x 2) and covered 15.5-38.0 and 7.5-16.0. The variants used on tractors were: a) full air in the front and rear tires with counterweights (ACC); b) Air incomplete in the front and rear tires (50%) with weights (AIC); c) Full air without counterweights (ACS); and d) Air incomplete (50%) without counterweights (AIS). The intensities of traffic consisted of 3, 5 and 10 strokes of the running system the same place in each of the variants described above, at a rate of speed of about 4 km h⁻¹.

Specific mean pressure of the running system

In order to determine the average specific ground pressure running system tractors, the contact area of the front and rear wheels for all variants studied, according to the methodology proposed by Liljedahl *et al.* (1984) (Figure 1).

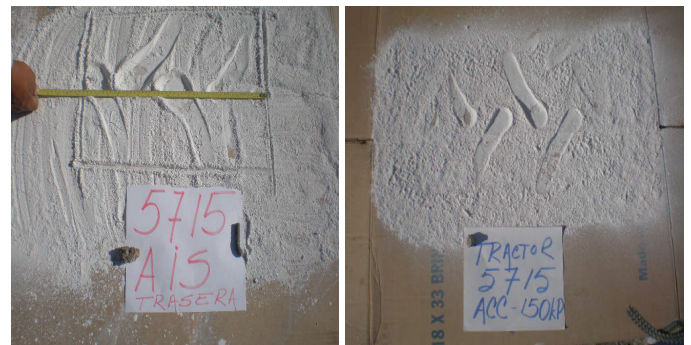


Figura 1. Huellas de los neumáticos traseros de un tractor John Deere® 5715 con aire incompleto (75 kPa) sin contrapesos (AIS, izquierda), y con aire completo (150 kPa) con contrapesos (ACC, derecha).

Figure 1. Traces of the rear tires of a tractor John Deere 5715 with incomplete air (75 kPa) without counterweights (AIS, left) and fully air (150 kPa) with weights (ACC, right).

The contact area of each tire to the ground is approximately elliptical in shape and is calculated by Equation 1:

$$A \approx 0.78 * a * b \quad 1)$$

Where: A= contact area of the tire on the ground; a= width of the contact area of the tire; b= length of the contact area of the tire; correction coefficient= 0.78.

In order to know the weight per unit area that rests on the floor as it passes the tractor across the field crop, Equation 2 is used:

Donde: A = área de contacto del neumático sobre el suelo; a = ancho del área de contacto del neumático; b = largo del área de contacto del neumático; 0.78 = coeficiente de corrección.

A fin de conocer la masa por unidad de área que descansa sobre el suelo a medida que pasa el tractor por el campo de cultivo, se utilizó la ecuación 2:

$$P_{\text{trac}} = W / (At) \quad 2)$$

Donde: P_{trac} = presión media específica del tractor sobre el suelo durante el tránsito rodado; W = masa del tractor con contrapesos y líquido en los neumáticos; At = superficie total de apoyo sobre el suelo de cultivo, de las ruedas delanteras y traseras calculada con ayuda de la ecuación 1.

En el Cuadro 1 se muestra la masa de los neumáticos y de los contrapesos metálicos, así como la masa del tractor, en dependencia de las diferentes condiciones en que se encuentran con o sin lastres, así como otros elementos de interés concernientes a los tractores utilizados en el experimento.

Cuadro 1. Características de los tractores utilizados en el ensayo y cálculo de sus masas en sus diferentes variantes.
Table 1. Characteristics of tractors used in the test and calculated weights in different variants.

Variables	Tractor 5715 (4 x 4)	Tractor 2755 (4 x 2)
Potencia en el motor, kW (CV)	60.4 (82.1)	65.6 (89.2)
Masa líquida en la rueda delantera al 75%, kg (dos ruedas)	≈ 100 (x 2 ≈ ≈ 200)	≈ 45.8 (x 2 ≈ 91.6)
Masa líquida en la rueda trasera al 75%, kg (dos ruedas)	≈ 250 (x 2 ≈ ≈ 500)	≈ 250 (x 2 ≈ ≈ 500)
Masa total sin lastre (sin contrapesos), kg	2.922	3.465
Masa total con contrapesos metálicos y lastre líquido, kg	4.094	4.466
Masa en el eje trasero (%)	≈ 50	≈ 75
Masa en el eje delantero (%)	≈ 50	≈ 25
Medida de las ruedas traseras	15.5 - 38	15.5-38
Medida de las ruedas delanteras	13.6 - 24	7.5-16

Resistencia a la penetración y grado de compactación

Para evaluar la compactación, se utilizó como medida alterna la resistencia a la penetración, obtenida mediante el empleo de un penetrómetro portátil (Field Scout SC 900 Soil Compaction Meter, Spectrum® Technologies, Inc; Aurora IL, USA), para determinar el índice de cono (IC), registrando

$$P_{\text{tra}} = W / (At) \quad 2)$$

Where: P_{tra} = specific mean pressure of the tractor on the ground for road traffic; W = weight of the tractor with counterweights and fluid in the tires; At = total bearing surface on the floor of crop, the front and rear wheels calculated using equation 1.

In Table 1, the weight of tires and metal balances shown, and the weight of the tractor, depending on the different conditions in which they find with or without weights, and other items of interest concerning tractors used in the experiment.

Penetration resistance and compactness

In order to determine the index, to assess compaction, penetration resistance, obtained by using a portable penetrometer (Aurora IL, USA Field Scout SC 900 Soil Compaction Meter, Spectrum® Technologies, Inc) was used as an alternative measure cone (IC), recording the average of the applied pressure in MPa, 5 to 15 15 to 30 and 30 to 45 cm deep. To this end, five readings were taken

penetrometer in tractor footprint of each plot for each level of depth, immediately after the passage of tractors. Determining the IC , was accompanied by the determination of the average soil moisture ($H_o\%$, gravimetric) according to NOM SEMARNAT- 021 2000 (2002). Before ripping operation, the IC control at random on the experimental plot with a minimum of 10 repetitions was determined.

el promedio de la presión aplicada en MPa, de 5 a 15 15 a 30 y 30 a 45 cm de profundidad. Para tal efecto, se tomaron cinco lecturas del penetrómetro en la huella del tractor de cada parcela para cada nivel de profundidad, inmediatamente después del tránsito de los tractores. La determinación del IC, fue acompañada de la determinación de la humedad promedio del suelo (H_o , % gravimétrica), según NOM-021-SEMARNAT-2000, (2002). Previo a la operación de subsoleo, se determinó el IC testigo de manera aleatoria en la parcela experimental con un mínimo de 10 repeticiones.

El grado de compactación (C_s), que mide el incremento o disminución de la compactación de un suelo después de realizar una operación tecnológica dada (aradura, cultivo, transporte, etc.), fue determinado mediante la ecuación (3) y sometido a pruebas de múltiples rangos para porcentaje por tipo de lastre.

$$C_s = \{(IC_{dt} - IC_{at}) / IC_{at}\} * 100, \% \quad 3)$$

Donde: IC_{dt} - índice de cono después de pasar el sistema de rodaje del tractor, kPa; IC_{at} - índice de cono antes del paso del sistema de rodaje del tractor, kPa;

Resultados y discusión

Presión media específica del sistema de rodaje

El área de las huellas de las ruedas del sistema de rodaje del TL resultó mayor que las del TM para cada variante. Esto puede explicarse por las características de las ruedas traseras del TL, que presentaron un mayor desgaste de la banda de rodamiento que las del TM; sin embargo, el TM presenta una mayor área de contacto total cuando se suman las áreas de las cuatro ruedas, ya que las dimensiones de los neumáticos delanteros del TM tienen una medida mayor (Cuadro 2). Como se puede observar en el cálculo, en la única variante que el TL tiene mayor área de contacto total es en la de AIS, puesto que en todas las demás su área total, está por debajo.

En la Figura 2 se aprecia que el TL ejerce una presión sobre el suelo de mayor magnitud, ya que su masa es mayor; también se observa que en todas las variantes, el TM al comenzar con ACC, descende la presión media específica hasta AIS, en contraparte, el TL, siempre que tiene en sus neumáticos ACC o ACS, sus valores de presión media específica son mayores que las demás variantes, esto debido a que las ruedas traseras presentaron un desgaste de aproximadamente 25%, resultando en una mayor superficie de contacto rueda-suelo.

The degree of compaction (C_s), which measures the increase or decrease of compaction of a soil after a given technological operation (plowing, culture, transport, etc.), was determined by equation (3) and tested multiple range for percentage by type of ballast.

$$C_s = \{(IC_{dt} - IC_{at}) / IC_{at}\} * 100, \% \quad 3)$$

Where: IC_{dt} - cone index after passing the running system of the tractor, kPa IC_{at} - cone index before step running system of the tractor kPa;

Results and discussion

Specific mean pressure of the running system

The area of the wheel tracks of the running system of the TL was higher than the TM for each variant. This can be explained by the characteristics of the rear wheels of TL, which showed an increased wear of the tread as the TM; however, the TM has higher total contact area when the areas of the four wheels are added, since the dimensions of the front tires of TM have a higher extent (Table 2). As shown in the calculation, the only variant in the TL has higher total contact area is in the AIS, as in all the other total area, below.

The Figure 2 shows that, the TL has a ground pressure of higher magnitude, since its weight is higher; also realizes that in all variants, the TM to start with ACC, down the specific mean pressure to AIS, in counterpart, TL, always having in the tires ACC or ACS, values of specific mean pressure are higher than the other variants, this due to the rear wheels showed a ware of about 25%, resulting in higher surface wheel-floor.

Penetration resistance and compactness

The Table 3 shows that in different variants the number of passes in road traffic, the TL showed a higher degree of compaction in the layer of 5 to 15 cm deep, because of the axle weight and the specific mean pressure (PME) exerted between the wheels and the ground, which is manifested in the superficial part, this results claims Raper and Erbach (1990) and Smith and Dickson (1990), showing that the degree of compaction of a soil is influenced , therefore the number of passes as by pressure.

Cuadro 2. Área de las huellas de las ruedas delanteras y traseras de los tractores agrícolas John Deere® empleados en el experimento.

Table 2. Area of the tracks of the front and rear of agricultural tractors John Deere® wheels used in the experiment.

Variable	Área de las ruedas (m ²)	
	5715 (4 x 4)	2755 (4 x 2)
Rueda trasera con contrapesos y aire completo (ACC), 150 kPa	0.168	0.207
Rueda trasera con contrapesos y aire incompleto (AIC), 75 kPa	0.204	0.233
Rueda trasera sin contrapesos y aire completo (ACS), 150 kPa	0.134	0.163
Rueda trasera sin contrapesos y aire incompleto (AIS), 75 kPa	0.152	0.237
Rueda delantera con contrapeso (ACC), 140 kPa (líquido en el neumático al 75 %)	0.15	0.073
Área total de los neumáticos del tractor asentados en el suelo con ACC	0.636	0.561
Área total de los neumáticos del tractor asentados en el suelo con AIC	0.708	0.614
Área total de los neumáticos del tractor asentados en el suelo con ACS	0.568	0.473
Área total de los neumáticos del tractor asentados en el suelo con AIS	0.604	0.62

Resistencia a la penetración y grado de compactación

En el Cuadro 3 se muestra que en las diferentes variantes del número de pasadas del tránsito rodado, el TL mostró un mayor grado de compactación en el estrato de 5 a 15 cm de profundidad, debido al peso por eje y a la presión media específica (PME) que se ejerce entre las ruedas y el suelo, lo cual se manifiesta en la parte superficial, esto afirma los resultados de Raper y Erbach (1990) y Smith y Dickson (1990), demostrando que el grado de compactación de un suelo está influenciado, tanto por el número de pasadas como por la presión ejercida.

Para el estrato de 15 a 30 cm de profundidad, se mostró una condición diferente para el TL en las diferentes pasadas, ya que fue inferior el grado de compactación y solo en la variante donde se realizaron diez pasadas prácticamente se mantuvo inalterado el grado de compactación (Cuadro 3). En ese mismo estrato, el grado de compactación para el TM fue menor, con la excepción de la variante con tres pasadas, en la que se mostró un aumento ostensible del grado de compactación por encima del testigo; esto puede explicarse por un piso de aradura que por años se ha mantenido inalterado por los diferentes manejos de labranza, y que haya posibilitado el mantener el IC los valores similares, aún con mayor *Ho* (2%) y menor *IC* (26%). En el estrato de 30 a 45 cm de profundidad la humedad fue mayor y con ello en cada uno de los tractores disminuyó el grado de compactación; dado que en el TM en su sistema de rodaje se tiene una mayor superficie de contacto y una menor presión media específica,

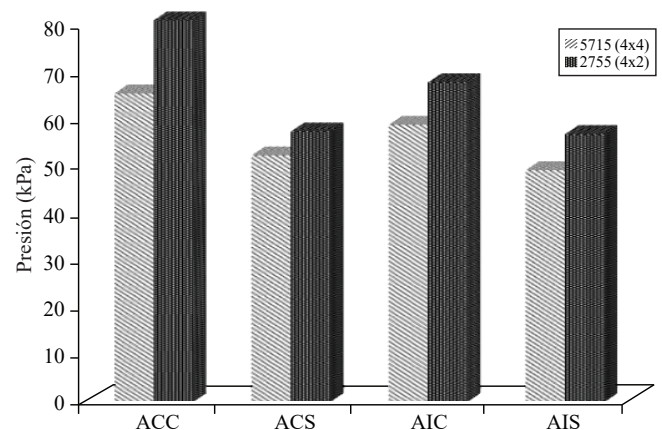


Figura 2. Presión media específica por unidad de área que ejerce el sistema de rodaje de los tractores sobre el suelo en cada una de las variantes.

Figure 2. Average specific pressure per unit area exerted by the running system tractors on the ground in each of the variants.

For the stratum from 15 to 30 cm deep, a different condition of TL in the different passes is shown as it was less the degree of compaction and only variant ten which were conducted past remained virtually unchanged the degree of compaction (Table 3). In the same layer, the degree of compaction for the TM was lower, with the exception of the variant with three passes, in which a conspicuous increase in the degree of compaction over the control was shown; this can be explained by a floor plowing which for years has remained unchanged by the different management of farming, and has made it possible to keep the *IC* similar values with even higher *Ho* (2%) and lower *IC* (26%). In the stratum of 30 to

se espera que muestre un grado de compactación nulo, es decir, un *IC* aritméticamente igual. En el estrato de 5 a 15 cm de profundidad, con excepción del TM, el *IC* excedió los 4 MPa, lo que según Draghi *et al.* (2001), sería limitante para el crecimiento del sistema radical de las plantas.

45 cm deep and moisture was thereby increased in each of the tractors decreased the degree of compaction; Given that TM on the running-system has a larger contact surface and a lower specific mean pressure, is expected to show a zero degree of compaction, namely, an *IC* arithmetically

Cuadro 3. Grado de compactación del suelo a distintas profundidades ocasionado por el número de pasadas de los tractores en el sitio experimental.

Table 3. Degree of compaction at various depths caused by the number of passes of tractors at the experimental site.

Número de pasadas	Profundidad					
	5 a 15 cm (%)		15 a 30 cm (%)		30 a 45 cm (%)	
	2 755 (4 x 2)	5 715 (4 x 4)	2 755 (4 x 2)	5 715 (4 x 4)	2 755 (4 x 2)	5 715 (4 x 4)
3	22.89	NC	4.4	9.92	2.34	NC
5	18.47	6.45	9.69	7.44	4.69	NC
10	26.68	10.75	23.78	10.28	9.85	NC
<i>IC</i> testigo (kPa)	4 183		3 080		1 880	
Ho (%)	14.35		16.27		21.31	

NC= no se apreció compactación; *IC*= índice de cono; Ho= humedad relativa.

En el Cuadro 4, se analiza el aumento del grado de compactación con respecto a las mediciones iniciales tomadas como testigo para cada una de las variantes, en las que se tiene en cuenta el aire en los neumáticos y contrapesos en los tractores. Los valores invertidos de compactación a nivel subsuperficial en la variante de ACC, en comparación con los del estrato de 5 a 15 cm, pueden atribuirse a un suelo más consolidado y también a un piso de aradura existente en la zona; ambos factores pudieran determinar un incremento en el *IC* muy por encima de lo esperado e incrementar de forma ostensible el grado de compactación, ya que en el estrato subsuperficial, a pesar de tener el TM un área de contacto rueda-suelo mayor y una presión media específica menor, tuvo un comportamiento diferente. Cuando se condujo el ensayo en AIC, el TL mostró un mayor grado de compactación en los tres estratos de profundidad medidos, esto debido a una menor superficie de contacto de los neumáticos y, por tanto una mayor presión media específica, que originó que en la senda de tránsito rodado se presentara una mayor compactación. El área de contacto del TM, en esta variante de tránsito rodado fue de 14.3 % por encima del TL.

En las pruebas de ACS, el TL presentó en los dos primeros estratos un mayor grado de compactación que el TM, esto puede atribuirse a que el TM presentó una mayor área de contacto de los neumáticos (16.3%) que el TL. Conviene señalar que como resultado de las características del Vertisol de estudio, en el estrato de 30 a 45 cm, el TM mostró una

equal. In stratum 5 to 15 cm deep, except TM, *IC* exceeded 4 MPa, which according Draghi *et al.* (2001) would be limiting for growing the root system.

In Table 4, the increase in the degree of compaction compared to initial measurements taken as a control for each of the variants, which takes into account the air in tires on tractors and balances is analysed. Inverted values subsurface compaction level ACC variant, compared to the layer of 5 to 15 cm, can be attributed to a more consolidated ground floor and a plowing existing in the area; both factors may determine the *IC* increased well above expected ostensibly and increase the degree of compaction, since the subsurface layer, although an area having the TM-wheel ground contact and a pressure higher average specific child, behaved differently. When tested in AIC was conducted, the TL showed a higher degree of compaction in the three strata of measured depth, this due to a smaller contact surface of the tire and therefore a higher specific mean pressure, which resulted in the path of road traffic increased compaction is presented. The contact area of the TM, in this variant of road traffic was 14.3% above the TL.

In tests of ACS, the TL presented in the first two strata compaction higher than the TM, this can be attributed to the TM showed a higher contact area of the tires (16.3%) than the TL. It should be noted that as a result of the characteristics of Vertisols under study, the layer of 30 to

mayor compactación (grado de compactación mayor en 12.67%) que el TL, éste último no mostró alteración del grado de compactación con respecto a lo medido en el testigo.

Para la variante AIS, el área de contacto rueda-suelo del TL fue de mayor superficie que el TM (aproximadamente 3%), pero al tener una mayor masa, su presión media específica resultó ser mayor, por lo que al realizar tránsito por el lote experimental reflejó mayor compactación superficial que lo obtenido por el testigo (26% mayor en el estrato de 5 a 15 cm). En este caso, el TM no modificó el grado de compactación, posiblemente por la distribución de su masa sobre la superficie en las cuatro ruedas, que origina que la presión ejercida en las capas superficiales sean menor, esto concuerda con los reportes de Botta *et al.* (2006). sin el estrato de 15 a 30 cm de profundidad y el continuo tránsito rodado de los tractores de ambas características hace que haya alteraciones en la capa subsuperficial del suelo transitado y en este caso el tractor 4x4 mostró un mayor grado de compactación que el TL, aunque no muy diferente en cuanto a magnitud, ya que en estas condiciones tiene un papel preponderante la densificación del suelo, el piso de aradura y otros factores físicos del suelo, coincidiendo con lo descrito por Gameda *et al.* (1987).

En relación con el estrato de profundidad de 30 a 45 cm, los valores determinados en ambos tractores tuvieron un comportamiento idéntico al testigo, lo cual puede explicarse a partir del estado previo del suelo pasaje de los tractores, dado que los valores medidos para este nivel de profundidad, fueron de 1.88 MPa y, en zonas transitadas para los niveles superficiales, fueron de 4.18 MPa y para el siguiente estrato de 3.08 MPa, lo que implicaría reducciones en el desarrollo radical de los cultivos según lo planteado por Threadgill (1982).

Conclusiones

La presencia de estratos densificados, producto de anteriores trabajos de preparación del suelo influyeron en el aumento del grado de compactación del suelo.

No obstante a la densificación de algunos estratos, no cabe la menor duda que el TL en su sistema de rodaje es el responsable de la mayor compactación en todas las variantes ensayadas.

45 cm, the compacting TM showed higher (higher degree of compaction in 12.67%) than the TL, the latter did not show altered level regarding compaction measured in the control.

Cuadro 4. Grado de compactación promedio del suelo después del tránsito rodado de tractores en función de las variantes utilizadas a distintas profundidades.

Table 4. Degree of compaction average road traffic after the tractor depending on the variety used at different depths.

Variables	5 715 (%)	2755 (%)
(ACC) de 5 a 15 cm	10.75	21.17
(ACC) de 15 a 30 cm	16.74	1.06
(ACC) de 30 a 45 cm	14.08	8.45
(AIC) de 5 a 15 cm	9.67	24.34
(AIC) de 15 a 30 cm	6.6	24.11
(AIC) de 30 a 45 cm	6.46	18.3
(ACS) de 5 a 15 cm	NC	24.63
(ACS) de 15 a 30 cm	11.89	13.54
(ACS) de 30 a 45 cm	12.67	NC
(AIS) de 5 a 15 cm	NC	26.97
(AIS) de 15 a 30 cm	16.74	12.01
(AIS) de 30 a 45 cm	NC	NC

NC=no compactación; ACC=aire completo y contrapesos; AIC=aire incompleto y sin contrapesos; ACS=aire completo y sin contrapesos, y AIS=aire incompleto y sin contrapesos.

For the AIS variant, the contact area of the TL wheel-soil surface was higher than TM (about 3%), but having a higher weight, its specific mean pressure was higher, so that when making transit through the experimental batch reflected higher surface compaction that obtained by the control (26% higher in the layer 5-15 cm). In this case, the TM did not change the degree of compaction, possibly for the distribution of weight on the surface on all four wheels, which causes the pressure in the superficial layers are lower, this is consistent with reports of Botta *et al.* (2006). Without the layer of 15-30 cm deep and continuous vehicular traffic of tractors, both features makes for changes in the sub-surface of soil travelled and in this case the 4 x 4 tractor showed a higher degree of compaction that the TL though not very different in magnitude, since in these conditions plays an important role densification of the soil, plowing floor and other physical factors of soil, coinciding with that described by Gameda *et al.* (1987).

Regarding the depth range 30-45 cm, the values determined in both tractors had identical behaviour than the control's, which can be explained from the previous state of the soil passage

El TM en su sistema de rodaje es el que menos impacto tiene en el grado de compactación del suelo.

El TM en su sistema de rodaje, cuando hay tránsito rodado de 3 y 5 pasadas es el que menor grado de compactación de suelo produce en las capas superficiales y subsuperficiales.

Las variantes donde se realizaron ensayos con AIC y AIS, fueron las que menos impacto tuvieron en el aumento del grado de compactación del suelo.

Existe una relación lineal entre la presión media específica de los tractores y el aumento del grado de compactación del suelo, en la mayoría de las variantes ensayadas.

Agradecimientos

Esta investigación fue desarrollada bajo los auspicios de los proyectos 2959/2010SF y 3091/2012 de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM).

Literatura citada

- Adebiyi, A.; Koike, T.; Yusawa, S. and Kuroishi, I. 1991. Compaction characteristics for the towed and driven conditions of a wheel operating on agricultural soil. *J. Terramechanics*. (28):371-382.
- Alakukku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. I. Short-term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil Tillage Res.* 37(1996):211-222.
- Botta, G.; Jorajuria, D. y Draghi, L. 1997. Responsabilidad del peso y la presión en la compactación de suelos labrados. Parte II. Cama de siembra. *Congreso Brasileiro de Engenharia Agrícola*. (1):10-16.
- Botta, G.; Jorajuria, D. and Draghi, L. 2002. Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *J. Terramechanics*. (39):47-54.
- Botta, G.; Jorajuria, D.; Balbuena, R. and Rosatto, H. 2004. Mechanical behavior of an agricultural soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) *Soil Tillage Res.* (78):53-58.
- Botta, G.; Jorajuria, D.; Balbuena, R.; Ressa, M.; Rosatto, H.; Tourn, M. and Ferrero, C. 2006. Deep tillage and traffic effect on subsoil compaction and sunflower yields. *Soil Tillage Res.* (91):164-172.
- Draghi, L.; Jorajuria, D.; Cerisola, C. y Botta, G. 2001. La cobertura vegetal interfilar en el monte frutal y su respuesta al tráfico. *In: IV Congreso Internacional de Ingeniería Agrícola*. Chillan Chile. 164-167.
- Gameda, S.; Raghavan, G. S.; McKeyes, E. and Theriault, R. 1987. Subsoil compaction in a clay soil. I. Cumulative effects. *Soil Tillage Res.* (10):113-122.

of tractors, since the values measured for this level deep were 1.88 MPa and in busy for superficial levels areas were 4.18 MPa and the next layer of 3.08 MPa, implying reductions in root crop development as proposed by Threadgill (1982).

Conclusions

The presence of densified layers, due to previous work of preparing the soil influenced the increase in the degree of soil compaction.

However, the densification of some strata, there is no doubt that the TL on the running system is responsible for the higher compaction in all the tested variants.

TM in the running system had less negative impact on the degree of compaction.

The TM on the running system, when there is traffic of 3 and 5 times, presents the lowest degree of soil compaction occurring in surface and sub-surface layers.

The variants where AIC and AIS tests were conducted and had less impact on the increase in the degree of compaction.

A linear relationship between the average specific pressure tractors and increasing the degree of compaction, in most of the variants tested.

End of the English version



- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2009. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Toluca, México. Clave geoestadística 15106. INEGI. México.
- Håkansson, I. and Reeder, R. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load-extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* (29):277-304.
- Jorajuria, D. 1996. El tráfico vehicular, la compactación y la sostenibilidad de la producción de madera. *In: actas del primer seminario de actualización en sistemas de cosecha y transporte forestal*. El Dorado, Argentina. 45-50 pp.
- Jorajuria, D.; Draghi, L. and Aragón, A. 1997. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of a lolium/trifolium grassland. *Soil Tillage Res.* 41(1997):1-12.
- Jorajuria, D. y Draghi, L. 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte 1: influencia del peso y del número de pasadas. *Rev. Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*. 4(3):445-452.

- Jung, K.; Kitchen, N.; Sudduth, K.; Lee, K.; and Chung, S. 2010. Soil compaction varies by crop management system over a claypan soil landscape. *Soil Tillage Res.* doi:10.1016/j.still.2009.12.007. 10 p.
- Liljedahl, J. B.; Turnquist, P. K.; Carleton, W. M. y Smith, D. W. 1984. *Tractores, diseño y funcionamiento*. Limusa, México. 431 p.
- NOM-021-SEMARNAT-2000. 2002. Norma Oficial Mexicana que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial*. México. 85 p.
- Oskoui, K. E. and Voorhees, W. B. 1990. Prediction of planting timeliness penalties for corn and soybean in northern Corn Belt. *Agron. Abstr.* 153 Madison, WI, USA.
- Rapper, R. and Erbach, D. 1990. Prediction of soil stresses using the finite element method. *Transactions of the ASAE.* 3(33):725-730.
- Smith, D. and Dickson, J. W. 1990. Contributions of weight and ground pressure to soil compaction. *J. Agric. Eng. Res.* (43):13-29.
- Taylor, J. and Gill, W. 1984. Soil compaction: state-of-art report. *J. Terramechanics.* 3(21):195-213.
- Threadgill, E. D. 1982. Residual tillage effects as determined by cone index. *Transactions of the ASAE, St. Joseph, MI.* (25):859-863.