



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS  
Y RECURSOS NATURALES**

**COMPACTACIÓN DEL SUELO DEBIDO AL TRÁNSITO DE  
MAQUINARIA AGRÍCOLA. RESPUESTA DE UN *Vertisol* A  
PRUEBAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EN TRES SISTEMAS  
DE LABRANZA**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS  
AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES**

**PRESENTA:**

**VÍCTOR MANUEL VACA GARCÍA**

**COMITÉ DE TUTORES:**

**PhD Francisco Gutiérrez Rodríguez. Tutor Académico.**

**Dr. Edgar Jesús Morales Rosales. Tutor Adjunto.**

**Dr. Andrés González Huerta. Tutor Adjunto.**

## **Dedicatoria**

Preferiría comprender una sola causa que ser Rey de Persia.  
Demócrito de Abdera

*A Fernando.*

## Resumen

### COMPACTACIÓN DEL SUELO DEBIDO AL TRÁNSITO DE MAQUINARIA AGRÍCOLA. RESPUESTA DE UN *Vertisol* A PRUEBAS DE COMPRESIÓN UNIAXIAL EN TRES SISTEMAS DE LABRANZA

Víctor Manuel Vaca García. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de México.

Comité de tutores: PhD Francisco Gutiérrez Rodríguez<sup>1</sup>. Tutor Académico; Dr. Edgar Jesús Morales Rosales<sup>1</sup>. Tutor Adjunto y; Dr. Andrés González Huerta<sup>1</sup>. Tutor Adjunto.

<sup>1</sup>Centro 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. E-mail: ejmoralesr@uaemex.mx, agonzalezh@uaemex.mx

El comportamiento a corto plazo de las propiedades físicas de un *Vertisol*, bajo sistemas de labranza tradicional y de conservación, en la zona de producción de maíz (*Zea mays* L.) del Valle Toluca-Atlacomulco, aún no ha sido reportado. Adicionalmente, se considera que se requieren de mediciones de laboratorio adicionales que puedan imitar las condiciones de campo, y que resulten sensibles, confiables y apropiadas para monitorear cambios en la compactación y otras propiedades físicas del suelo mientras se reduce el muestreo destructivo en campo. Esta investigación se planteó como objetivos: utilizar las pruebas de compresión uniaxial, resistencia a la penetración y fuerza de corte en una máquina universal de prueba, para evaluar la respuesta de un *Vertisol* en términos de dureza, cohesividad y adhesividad cuando es compactado por tránsito rodado en tres sistemas de labranza: tradicional (LT), mínima (LM) y cero (LC) y; evaluar el efecto de los sistemas de labranza sobre la compactación de un *Vertisol* y el rendimiento de maíz. El estado de la compactación se caracterizó mediante la medición de la densidad aparente, resistencia a la penetración, mediante el índice de cono, y, velocidad media de infiltración del agua en cada ciclo de cultivo del periodo de estudio. Los ensayos en la máquina universal de prueba resultaron suficientemente sensibles para detectar diferencias en las propiedades físicas del suelo de los diferentes sistemas de labranza. Los mayores valores de rendimiento fueron obtenidos en LM. El análisis de las distintas variables no permitió determinar, en el corto plazo, tendencias claras en el incremento o remediación de los parámetros de compactación del *Vertisol* bajo los diversos sistemas de labranza.

**Palabras clave:** *densidad aparente, velocidad de infiltración, dureza, adhesividad, Zea mays* L.

## Abstract

### SOIL COMPACTION DUE TO AGRICULTURAL TRANSIT. *Vertisol*'S RESPONSE TO UNIAXIAL COMPRESSION TESTS IN THREE TILLAGE SYSTEMS

Víctor Manuel Vaca García. Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Universidad Autónoma del Estado de México.

Comité de tutores: PhD Francisco Gutiérrez Rodríguez<sup>1</sup>. Tutor Académico; Dr. Edgar Jesús Morales Rosales<sup>1</sup>. Tutor Adjunto y; Dr. Andrés González Huerta<sup>1</sup>. Tutor Adjunto.

<sup>1</sup>Centro 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. E-mail: ejmoralesr@uaemex.mx, agonzalezh@uaemex.mx

Short-term behavior of a *Vertisol*'s physical properties, under conventional and conservation tillage systems on the maize (*Zea mays* L.) production zone of the Toluca-Atacomulco Valley, has not been reported yet. In addition, it is considered that more laboratory measurements are needed that can imitate field conditions and that are sensitive, reliable and appropriate to monitor changes in compaction and other physical soil properties while reducing destructive sampling in the field. The objectives of this research were: to use uniaxial compression, penetration resistance and cutting force tests in an universal testing machine, to evaluate the response of a *Vertisol* soil in terms of hardness, cohesiveness and adhesiveness when compacted by wheel traffic in three different types of tillage systems: zero (LC), minimal (LM) and conventional (LT). In addition, to evaluate the effect of traditional minimum and zero tillage systems on *Vertisol*'s compaction and maize yield. State of soil compactness was characterized by measuring bulk density, penetration resistance through cone index, and mean soil water infiltration rate in each crop cycle. Trials using the universal testing machine were sensitive enough to detect the differences in the soil physical properties of the different tillage systems. Highest yield values for all crop cycles were obtained with LM. Analysis of studied physical variables could not determine, in the short term, clear tendencies in increases or amelioration of *Vertisol*'s compaction parameters under the different tillage systems.

Keywords: *Zea mays* L., bulk density, infiltration rate, hardness, adhesiveness.

## **Agradecimientos**

Al PhD Francisco Gutiérrez Rodríguez, por permitirme participar en su proyecto de investigación, por su experta guía en el manejo de los temas del proyecto y actividades relacionadas, así como su invaluable apoyo, tanto profesional como personal, durante el tiempo bajo su tutoría académica. A los tutores adjuntos, Dr. Edgar Jesús Morales Rosales y Dr. Andrés González Huerta, por su constante supervisión durante el desarrollo el proyecto; al Dr. Aurelio Domínguez López, por las facilidades prestadas para el uso del equipo de laboratorio y; al Dr. Jesús Hernández Ávila, por brindarme siempre su consejo a lo largo de todo mi desarrollo académico en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) y al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por las becas otorgadas que posibilitaron la conclusión de este trabajo de tesis.

# Contenido

|   |      |
|---|------|
| Dedicatoria .....   | i    |
| Resumen .....   | ii   |
| Abstract .....  | iii  |
| Agradecimientos .....   | iv   |
| Lista de Cuadros .....  | vii  |
| Lista de Figuras .....  | viii |
| <br>  |      |
| I. Introducción general.....  | 1    |
| II. Revisión de literatura .....  | 3    |
| 2.1. Concepto de suelo .....  | 3    |
| 2.2. Descripción de la unidad de suelo <i>Vertisol</i> presente en el Estado de México .....            | 3    |
| 2.2.1. <i>Clima</i> .....   | 3    |
| 2.2.2. <i>Vegetación</i> .....  | 4    |
| 2.2.3. <i>Topografía</i> .....  | 4    |
| 2.2.4. <i>Distribución</i> .....  | 4    |
| 2.2.5. <i>Utilización</i> .....   | 4    |
| 2.3. Algunas propiedades físicas de los suelos agrícolas .....  | 4    |
| 2.3.1. <i>Densidad aparente</i> .....   | 5    |
| 2.3.2. <i>Resistencia a la penetración</i> .....  | 6    |
| 2.3.3. <i>Velocidad de infiltración del agua en el suelo</i> .....                                      | 8    |
| 2.3.4. <i>Cohesión</i> .....  | 9    |
| 2.3.5. <i>Adhesividad</i> .....   | 10   |
| 2.3.6. <i>Principio de cuña y cortado del suelo</i> .....   | 10   |
| 2.4. Determinación de algunas variables físicas del suelo mediante una máquina de ensayo mecánico ..... | 13   |
| 2.5. Conceptos básicos de compactación del suelo .....  | 14   |
| 2.6. Conceptos y objetivos de la labranza de suelos .....   | 17   |
| <br>  |      |
| III. Justificación .....  | 19   |
| IV. Hipótesis .....   | 20   |
| V. Objetivos .....  | 21   |
| <br>  |      |
| VI. Material y método .....   | 22   |
| 6.1. Descripción del sitio experimental .....   | 22   |
| 6.2. Diseño experimental .....  | 23   |
| 6.3. Propiedades químicas del suelo .....   | 24   |
| 6.4. Pruebas de compresión uniaxial .....   | 25   |
| 6.5. Fuerza de corte .....  | 26   |
| 6.6. Densidad aparente .....  | 27   |
| 6.7. Resistencia a la penetración (en campo) .....  | 27   |
| 6.8. Velocidad media de infiltración .....  | 28   |

|   |    |
|---|----|
| 6.9. Rendimiento de grano .....   | 29 |
| 6.10. Análisis estadístico .....  | 29 |
| VII. Resultados .....   | 30 |
| 7.1. Capítulo propuesto para libro: “Tópicos Selectos de Horticultura y Manejo de Suelo” .... | 30 |
| 7.2. Artículo publicado en Terra Latinoamericana, 32(2):119-126 .....                         | 48 |
| 7.3. Artículo publicado en Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8(5):1495-1507 .....       | 57 |
| VIII. Discusión general .....   | 71 |
| IX. Conclusión general .....  | 72 |
| X. Referencias bibliográficas .....   | 73 |

## Lista de Cuadros

|   | Página |
|---|--------|
| Cuadro 1. Valores de la densidad aparente ( <i>DA</i> ) de suelos de diferentes texturas.                       | 5      |
| Cuadro 2. Interpretación de resultados del cálculo de la densidad aparente ( <i>DA</i> ).                       | 6      |
| Cuadro 3. Influencia del tipo de lluvia sobre la energía de impacto.  | 16     |
| Cuadro 4. Lámina de lluvia y temperatura media mensual 2010-2012 del área de estudio y normales climatológicas. | 23     |

## Lista de Figuras

|  | Página |
|--|--------|
| Figura 1. Penetrómetro digital con punta cónica.   | 8      |
| Figura 2. Separación de fragmentos de suelo por la acción de la cuña.  | 11     |
| Figura 3. Interacción de cuña de dos caras, también llamada de dos bordes.   | 12     |
| Figura 4. Interacción de cuña de dos caras con ángulo $\gamma$ .   | 12     |
| Figura 5. Máquina de ensayo mecánico típica utilizada en análisis de materiales, especialmente de alimentos (Analizador de Textura). | 13     |
| Figura 6. Área del campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México.          | 22     |
| Figura 7. Suelo del lote experimental.   | 24     |
| Figura 8. Siembra y fertilización de parcela de labranza cero.   | 24     |
| Figura 9. Pase de multirado en parcela de labranza mínima.   | 24     |
| Figura 10. Pase de arado de disco en labranza tradicional.   | 24     |
| Figura 11. “Soil Core Sampler”.  | 25     |
| Figura 12. Toma de muestras con el “Soil Core Sampler” sobre la huella del tractor para su análisis en laboratorio.                  | 25     |
| Figura 13. Sonda para la prueba de CUD montada en la máquina universal de prueba.  | 26     |
| Figura 14. Representación de la punta de la sonda utilizada para la prueba de $R_p$ en laboratorio.                                  | 26     |
| Figura 15. Sonda de $R_p$ montada en la máquina universal de prueba.   | 26     |
| Figura 16. Representación de la punta de la sonda utilizada para la prueba de $F_c$ en laboratorio.                                  | 27     |

Figura 17. Muestra dispuesta horizontalmente para la prueba de fuerza de corte. 27

Figura 18. Infiltrómetro de doble cilindro utilizado para determinar la velocidad media de infiltración del agua en el suelo. 28

## I. Introducción general

La adopción de la agricultura intensiva a nivel mundial, la cual involucra ciclos de cultivo más cortos y frecuentes y el uso de maquinaria más pesada, ha originado un incremento en la compactación del suelo (Poesse, 1992). La compactación incrementa la dureza del suelo y disminuye su fertilidad física al minimizar el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, lo que ocasiona requerimientos adicionales de fertilización y un mayor costo de producción. Ocurre entonces una secuencia perjudicial de crecimiento reducido de la planta, que origina menores entradas de materia orgánica fresca al suelo, un reducido reciclaje de nutrientes y mineralización, menor actividad de microorganismos y un mayor uso y desgaste de la maquinaria de cultivo (Hamza y Anderson, 2005). A nivel mundial, alrededor de 68 millones de hectáreas de suelo han sido degradadas por la compactación, principalmente como resultado del tránsito de maquinaria agrícola (Flowers y Lal, 1998).

Se estima que, en cualquier superficie donde opere tránsito rodado de maquinaria agrícola, se requiere el uso de la labranza para regresar al suelo a una baja impedancia para la exploración de raíces y a un estado conductivo para la infiltración del agua (Carter *et al.*, 1991). En este sentido, el sistema de labranza convencional (tradicional), involucra una alta intensidad de trabajo del suelo y el volteo del mismo (Filipovic *et al.*, 2006), mientras que los sistemas de labranza de conservación tratan de alterar al suelo lo menos posible para conservar su estructura natural, lo que debería conducir a una menor compactación (Varsa *et al.*, 1997; Weise y Bourarach, 1999).

La cuantificación de la compactación del suelo con frecuencia requiere de un muestreo destructivo y, por consiguiente, su medición directa se considera generalmente impráctica. En su lugar, se han desarrollado diversos experimentos en laboratorio para analizar la respuesta del suelo al tránsito de maquinaria, utilizando pruebas confinadas de compresión uniaxial (Dawidowski and Lerink, 1990; O'Sullivan, 1992; Sánchez-Girón *et al.*, 1998). A su vez, a pesar de que diversas investigaciones han determinado la duración de los efectos adversos de la aplicación de tránsito rodado y prácticas de labranza en *Vertisoles* (Radford *et al.*, 2007; Alakukku, 1996), el comportamiento de las propiedades físicas de un *Vertisol* a corto plazo, específicamente en la principal zona de producción de maíz (*Zea mays* L.) del Estado de México, correspondiente al Valle Toluca - Atlacomulco, bajo

sistemas de labranza tradicional y de conservación, aún no ha sido estudiado, por lo que la presente investigación se planteó como objetivos:

1. Determinar la resistencia a la penetración, adhesividad, cohesividad y fuerza de corte, mediante una máquina universal de prueba, de un *Vertisol* sometido al efecto de tres sistemas de labranza.
2. Evaluar el efecto de tres sistemas de labranza sobre la densidad aparente, resistencia a la penetración y velocidad de infiltración del agua en un *Vertisol*, así como sobre el rendimiento de maíz en tres ciclos de cultivo anuales consecutivos.

Para cumplir con los objetivos mencionados, la etapa experimental se desarrolló en dos partes: durante la primera, se contrastó la hipótesis en la que se establece que los ensayos de compresión uniaxial, en una máquina universal de prueba, son suficientemente sensibles para determinar diferencias en la compactación de muestras de suelo de los diferentes sistemas de labranza. En la segunda parte, se estudió el efecto de tres sistemas de labranza sobre algunos indicadores de la compactación y rendimiento de maíz, contrastando la hipótesis en la que se plantea que los sistemas de labranza de conservación mínima y cero, aplicados en un *Vertisol* a corto plazo, originan menor compactación que el sistema de labranza tradicional, así como un mayor rendimiento del cultivo de maíz.

Se pretende que la generación de nuevos conocimientos sobre nuevas técnicas de laboratorio para cuantificar la compactación del suelo, así como la determinación de posibles ventajas de la adopción de sistemas de labranza de conservación para la producción de maíz, permitan obtener datos de manera expedita para una toma de decisiones que implique ventajas ambientales y productivas.

## II. Revisión de literatura

### 2.1. Concepto de suelo

El término suelo proviene del latín *solum* que significa piso o terreno. En general, el suelo se refiere a la superficie suelta de la tierra para distinguirlo de la roca sólida (Ortiz y Ortiz, 1980). De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002), el suelo se define como la colección de cuerpos naturales formados por sólidos (minerales y orgánicos), líquidos y gases sobre la superficie de los terrenos, y que presenta horizontes o capas que se diferencian del material de origen como resultado de adiciones, pérdidas, migraciones y transformaciones de energía y materia, o por la habilidad de soportar raíces de plantas en un ambiente natural.

La unidad de estudio en los suelos es el perfil de suelo (Ortiz y Ortiz, 1980), dicho perfil es el corte vertical de un suelo que exhibe todos los horizontes genéticos que lo integran y parte del material subyacente relativamente inalterado. Los horizontes son capas del suelo paralelas a la superficie de la tierra que tienen características distintivas producto de los procesos físicos, químicos y biológicos de formación del suelo (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

### 2.2. Descripción de la unidad de suelo *Vertisol* presente en el Estado de México

Los *Vertisoles* (del latín *vertere*: voltear, y *sol*: suelo) son suelos minerales que se caracterizan por su elevado contenido de arcilla, 30% o más en todo el perfil y como mínimo en un espesor de por lo menos 50 cm. Las arcillas son predominantemente esmectíticas, por lo que al secarse desarrollan grietas verticales anchas y profundas, que aparecen durante algún periodo del año. Son suelos de colores gris oscuro (de negro a pardo-rojizo) (Porta *et al.*, 1999).

#### 2.2.1. *Clima*

El clima donde se presentan los *Vertisoles* en el Estado de México es templado subhúmedo con lluvias en verano, temperaturas de 12 a 18 °C y precipitación de 700 a 1000 mm anuales (INIFAP, 2010).

### 2.2.2. Vegetación

Para el Estado de México, la vegetación que predomina en *Vertisoles*, debido a su gran fertilidad natural y alta productividad, es la relacionada con la agricultura de temporal y riego, pastizales, hierbas anuales y bosques de pino (INIFAP, 2010).

### 2.2.3. Topografía

La topografía donde se presentan estos suelos en el Estado de México es plana, donde hay agricultura de riego y temporal, con pendientes menores de 12% (INIFAP, 2010).

### 2.2.4. Distribución

Los *Vertisoles* ocupan el cuarto lugar en superficie en el Estado de México, con 2135.87 km<sup>2</sup> que se distribuyen en los Distritos de Zumpango (501.25 km<sup>2</sup>), Toluca (482.72 km<sup>2</sup>), Jilotepec (374.14 km<sup>2</sup>), Atlacomulco (279.6 km<sup>2</sup>), Coatepec Harinas (206.73 km<sup>2</sup>), Valle de Bravo (136.17 km<sup>2</sup>) y Texcoco (114.39 km<sup>2</sup>) (INIFAP, 2010).

### 2.2.5. Utilización

El elevado contenido de arcilla de los *Vertisoles* puede imponer fuertes limitaciones para su empleo. Frecuentemente, los *Vertisoles* son deficientes en muchos macro y micronutrientes para las plantas. El contenido de nitrógeno, fósforo y potasio es bajo y tiene que ser complementado con adición de fertilizantes si se desean obtener rendimientos elevados (FAO-ISRIC y SICS, 1999; IUSS Working Group WRB, 2006). Los cultivos principales que se desarrollan en el Estado de México sobre estos suelos son, maíz, trigo, cebada, avena, hortalizas y pastizales en los Distritos de Atlacomulco, Toluca, Texcoco, Zumpango y Jilotepec (INIFAP, 2010).

## 2.3. Algunas propiedades físicas de los suelos agrícolas

El suelo es una mezcla porosa de partículas minerales y orgánicas, agua y aire. Las partículas sólidas constituyen la matriz o esqueleto del suelo, son generalmente pequeñas y pueden estar dispersas o unidas con otras partículas formando agregados. En los espacios que los sólidos dejan libres se alojan el agua y el aire (Narro, 1994). El suelo no sólo constituye el soporte y fuente de alimentación de las plantas de cultivo, sino que además, es objeto de una serie de acciones por parte de vehículos y máquinas agrícolas (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989). Para comprender el sentido

físico de los procesos que tienen lugar en el suelo bajo dichas acciones, se hace necesario estudiar sus principales propiedades (Silveira, 1980), para fines del presente estudio se consideran las siguientes:

### 2.3.1. Densidad aparente

La densidad aparente del suelo (*DA*), es la relación entre la masa de los sólidos y el volumen total que éstos ocupan, incluyendo el espacio poroso existente entre las partículas sólidas (Narro, 1994). Comúnmente, la *DA* se expresa en gramos por centímetro cúbico ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002). Su valor varía de  $1.0 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en suelos arcillosos, orgánicos y bien estructurados, hasta alrededor de  $1.8 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  en suelos arenosos compactados. Los suelos arenosos son relativamente bajos en espacio vacío total y proporcionalmente tienen densidades aparentes altas. Las densidades aparentes aumentan con la profundidad en el perfil del suelo, esto se debe a niveles más bajos de materia orgánica, menor agregación y más compactación (Aguilera y Martínez, 1996).

En el Cuadro 1 se presentan varios ejemplos de valores de densidad aparente donde se aprecia que el valor de esta propiedad disminuye a medida que se incrementa el contenido de arcilla en el suelo (Narro, 1994).

**Cuadro 1. Valores de la densidad aparente (*DA*) de suelos de diferentes texturas.**

| <i>Clase textural</i>   | <i>DA</i> ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) | <i>Clase textural</i>  | <i>DA</i> ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) |
|-------------------------|---|------------------------|---|
| Arena                   | 1.5 – 1.8                                   | Migajón arcillo-limoso | 1.15 – 1.3                                  |
| Arena migajón           | 1.4 – 1.7                                   | Arcilla arenosa        | 1.1 – 1.25                                  |
| Migajón arenoso         | 1.3 – 1.5                                   | Arcilla limosa         | 1.1 – 1.25                                  |
| Migajón                 | 1.2 – 1.4                                   | Arcilla                | 1.05 – 1.2                                  |
| Migajón limoso          | 1.15 – 1.4                                  | Arcilla en agregados   | 0.9 – 1.1                                   |
| Limo                    | 1.15 – 1.4                                  | Arcilla sódica         | 1.2 – 1.5                                   |
| Migajón arcillo-arenoso | 1.15 – 1.3                                  | Arena compactada       | 1.8 – 1.9                                   |
| Migajón arcilloso       | 1.15 – 1.3                                  | Suelo orgánico         | 0.8 – 1.0                                   |

Fuente: Narro, 1994.

La Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002), establece que la determinación de la densidad aparente del suelo se realizará a través del método utilizando parafina (método del terrón parafinado). La densidad aparente por éste método, es calculada a partir del conocimiento de dos parámetros: la masa del suelo y el volumen total, es decir, el volumen de los sólidos y el volumen ocupado por el espacio poroso. En el caso de la masa, ésta se conoce pesando la muestra (terrón) y en el caso del volumen, éste es determinado de manera indirecta recubriendo el terrón con una capa de parafina y pesándolo sumergido en un líquido (agua). Existe una clara relación del valor de la densidad aparente con otras propiedades y características de los suelos, como la textura, el contenido de materia orgánica, la porosidad, la compactación, la conductividad térmica y la resistencia del suelo a la penetración. Desde el punto de vista agrícola, los valores bajos de densidad aparente se asocian con una condición general más apropiada para los cultivos (Narro, 1994).

En el Cuadro 2 se interpretan los resultados de la determinación de la *DA* según la Norma Oficial Mexicana (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002):

**Cuadro 2. Interpretación de resultados del cálculo de la densidad aparente (*DA*).**

| <i>DA</i> (g·cm <sup>-3</sup> ) | Tipos de suelo         |  |
|---------------------------------|------------------------|--|
| < 1.00                          | Orgánicos y volcánicos |  |
|                                 | Minerales:             |  |
| 1.0 – 1.19                      | Arcillosos             |  |
| 1.20 – 1.32                     | Francosos              |  |
| > 1.32                          | Arenosos               |  |

Adaptado de NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002.

### 2.3.2. Resistencia a la penetración

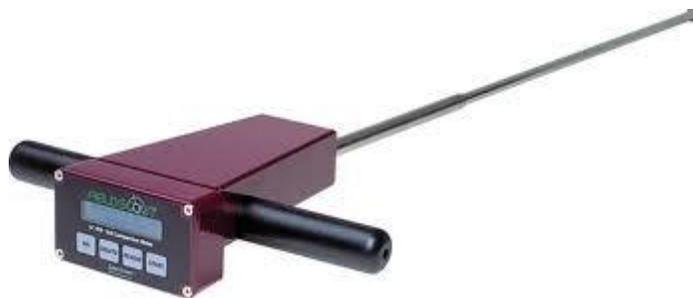
Es la fuerza que opone el suelo a la introducción de una determinada herramienta de sondeo, proporcionando una idea de su dureza para las condiciones específicas en que se encuentra en un determinado momento. Su valor es un índice integrado de la compactación del suelo, del contenido de humedad, de la textura, del tipo de arcilla mineral presente, del contenido de materia orgánica y de la estructura del suelo. Por lo anterior, en su medición se deben considerar estas características (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989; Narro, 1994).

Aunque los valores obtenidos de resistencia no reflejan más que un índice, que a su vez depende de la forma del elemento que se ha introducido en el suelo (placas, semiesferas, conos, etc.), es posible encontrar una relación entre la resistencia a la penetración y la que opone el suelo a una acción diferente producida por un neumático o a una determinada herramienta de trabajo de un apero agrícola. Actualmente, gran parte de las líneas de investigación que se llevan a cabo para establecer ecuaciones de predicción, en relación con lo mencionado con anterioridad, consideran como variable principal la resistencia a la penetración o índice de cono. La ventaja de manejar esta variable para los diferentes estudios del comportamiento del suelo ante acciones externas, radica en el gran número de mediciones que se pueden efectuar en un corto espacio de tiempo, esto permite conocer la variabilidad que presenta el suelo y actuar en consecuencia a la hora de establecer conclusiones (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989).

Los instrumentos que se utilizan para la determinación de la resistencia a la penetración son los llamados penetrómetros (si miden sobre escala numérica), o penetrógrafos (si registran dicha variable). Los equipos manuales incluyen una serie de dispositivos o elementos comunes (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989):

- a) Captador de esfuerzos (mecánico, electrónico o hidráulico).
- b) Cuantificador (escala numérica, indicador digital, registrador, etc.).
- c) Varilla soporte.
- d) Elemento de penetración (semiesfera, placa, punta cónica, etc.).

Entre todos los sistemas diseñados para caracterizar la resistencia a la penetración, el más utilizado es el penetrómetro de punta cónica de 30° (ASABE, 2008a) (Figura 1). Este aparato se caracteriza por el empleo de dos tipos de puntas cónicas definidas por el diámetro de la base del cono (20.27 o 12.83 mm) (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989). El penetrómetro de cono determina un índice de la dureza del suelo, conocido como índice de cono (*IC*), que se define como la fuerza por unidad de área base de cono requerida para empujar el instrumento a través de un pequeño incremento específico de profundidad (ASABE, 2008b).



Fuente: SC 900 Soil Compaction Meter, Spectrum Technologies, Inc.

**Figura 1. Penetrómetro digital con punta cónica.**

El *IC*, al ser una función de las variables mecánicas del suelo, disminuye con el contenido de humedad, tiene relación con la cohesión molecular y aumenta con el grado de compresión. También se ha encontrado una estrecha relación entre el *IC* y el crecimiento radicular, con valores críticos en que la penetración de las raíces se restringe severamente mayores a 2 MPa (Silva *et al.*, 2000).

### *2.3.3. Velocidad de infiltración del agua en el suelo*

La infiltración se refiere a la entrada del agua en el suelo. La cantidad de agua que se infiltra en un suelo en una unidad de tiempo, bajo condiciones de campo, disminuye conforme aumenta la cantidad de agua que ya ha entrado en él, la cual es máxima al comenzar la aplicación de agua en el suelo. La disminución de la infiltración a medida que transcurre el tiempo, después del humedecimiento de un suelo, es de gran importancia para los estudios de aprovechamiento de agua de lluvia y riego (Aguilera y Martínez, 1996).

La velocidad de infiltración es la relación entre la lámina que se infiltra y el tiempo que tarda en hacerlo, expresada generalmente en  $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$  o  $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$  (De la Peña, 1977). La velocidad de infiltración depende de muchos factores, entre ellos: la lámina de riego o de lluvia, la temperatura del agua y del suelo, la estructura y compactación, textura, contenido de humedad del suelo, estratificación y actividades microbianas. Las determinaciones de infiltración pueden efectuarse en el laboratorio, sobre muestras alteradas y/o inalteradas, o siguiendo algunos métodos de campo (Aguilera y Martínez, 1996).

#### 2.3.4. Cohesión

Se puede definir como la unión entre las partículas del suelo, debida a fuerzas de atracción mutuas que surgen de mecanismos fisicoquímicos. En un suelo se distinguen dos tipos de cohesión que se manifiestan según si se trata de medir dicha variable sobre una muestra inalterada o, por el contrario, disgregada, en ambos casos la humedad tiene una influencia fundamental (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989):

a) Cohesión molecular; es debida a las uniones catiónicas, fuerzas de Van der Waals y cementaciones entre los materiales del suelo. Las partículas de arcilla tienen carga negativa, mientras que la del agua es positiva, lo que permite establecer una unión fuerte entre moléculas, tanto mayor cuanto menor es el contenido de humedad. Al agregar agua, se produce una separación en las moléculas de arcilla traduciéndose en una reducción en las fuerzas de atracción. En suelos parcialmente secos e inalterados, encontrados al realizar labores profundas, la cohesión molecular es una de las variables que mayor influencia tiene sobre la fragmentación, tamaño de los terrones y resistencia a la rotura.

b) Cohesión superficial; la que se debe a la tensión superficial o atracción ejercida por las moléculas de agua que rodean y envuelven a los gránulos del suelo y que no actúa sin humedad (Silveira, 1980). En un suelo constituido por partículas y agregados de diferentes tamaños, se forma una red de huecos donde se aloja aire y agua, ésta última se acumula próxima a las zonas de contacto entre partículas formando un menisco, que produce una fuerza de atracción debido a la tensión superficial. Cuando la humedad es baja, el número de meniscos formados es pequeño y por tanto su cohesión superficial también, pero a medida que el contenido de agua se hace mayor, aumenta este tipo de uniones y por consecuencia su cohesión. Si se sigue añadiendo agua llega un momento en que se reduce el número de meniscos, ya que se producen uniones entre ellos, con lo que la atracción entre partículas se reduce (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989).

La cohesión generalmente se expresa en  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ . En suelos arenosos presenta valores que no exceden los  $5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$ , mientras que en suelos arcillosos alcanza valores de 50 a  $60\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}$  (Silveira,

1980). La cohesión es una de las variables dinámicas que más influye en el análisis de la plasticidad<sup>1</sup> y resistencia al esfuerzo cortante del suelo<sup>2</sup>.

### *2.3.5. Adhesividad*

Es la propiedad del suelo húmedo de adherirse a los objetos que se introducen o se ponen en contacto con él. Además del contenido de humedad, depende de la composición mecánica y química del suelo, entre otros factores. Se presenta en suelos con estructura definida cuando el contenido de agua alcanza 60 a 70%, y en suelos sin estructura definida de 40 a 54%. Puede medirse por la fuerza (en gramos) necesaria para separar del suelo, una placa metálica de 1 cm<sup>2</sup> al cual está adherida. De acuerdo al grado de adhesividad, se consideran suelos muy adhesivos los que muestran un valor mayor a 15 g·cm<sup>-2</sup>; simplemente adhesivos los que requieran una fuerza de 2 a 5 g·cm<sup>-2</sup>; y no adhesivos, los que necesitan una fuerza por debajo de 0.5 g·cm<sup>-2</sup> (Silveira, 1980).

La adhesión del suelo a los órganos de trabajo de los implementos agrícolas, se produce cuando la suma de las fuerzas específicas de fricción y de adhesividad del suelo, con respecto a la superficie de dichos órganos, resulta mayor que la resistencia instantánea del suelo a la fragmentación. Cuando la fuerza de fricción interna (suelo sobre suelo) es mayor que la suma de las fuerzas de adhesividad del suelo sobre el metal, se produce la autolimpieza de las superficies de trabajo. La adhesión del suelo a los órganos de trabajo dificulta el proceso tecnológico, empeora la calidad del trabajo y aumenta la resistencia de tracción de la máquina (Silveira, 1980).

### *2.3.6. Principio de cuña y cortado del suelo*

La mayoría de los órganos de trabajo de los aperos e implementos para la preparación primaria de los suelos y, en algunos casos, de la secundaria, tienen forma de cuña (en forma de arco o plana), dicha superficie entra en contacto con el suelo para roturarlo, ya sea cuando el filo de la cuña trabaja o actúa en el plano horizontal (arado de vertederas o cultivadores) o en el plano vertical

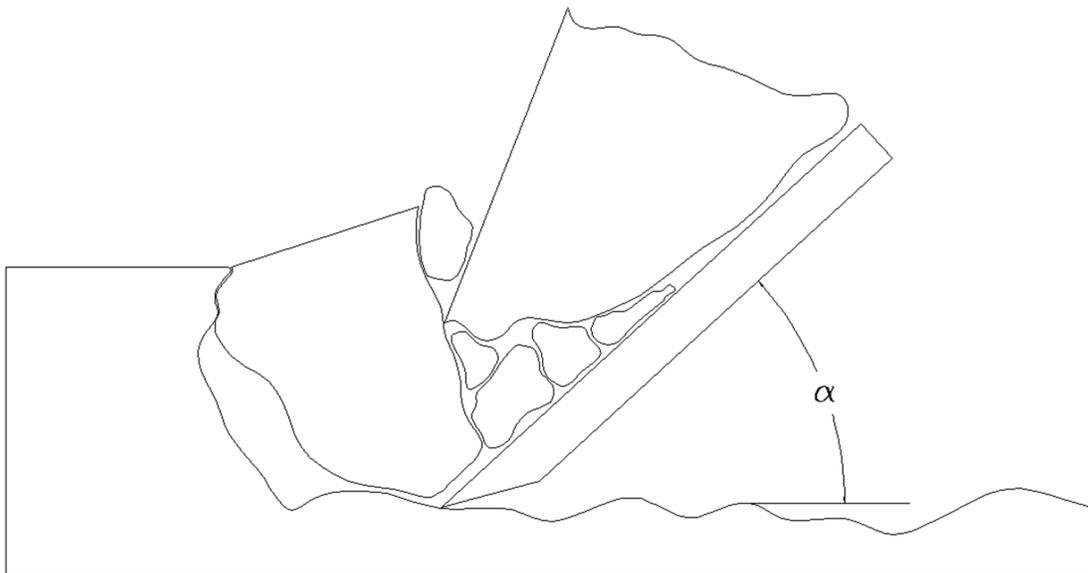
---

<sup>1</sup> La plasticidad del suelo es su capacidad para ser moldeado o deformado por la aplicación de una fuerza, y conservar su nueva forma cuando cesa esa fuerza (Narro, 1994).

<sup>2</sup> El esfuerzo cortante es una fuerza que tiende a modificar la forma del suelo, desplazando las partículas de un lado de una superficie dentro del suelo, sobre aquellas que están en el otro lado de la superficie (Narro, 1994).

(escarificadores o surcadores). Al efecto de fraccionar el suelo en función de la interacción que una cuña realiza al momento de penetrarlo se le conoce como *principio de cuña* (Gutiérrez, 2010).

El proceso desarrollado durante el trabajo de penetración de una cuña de forma recta y con superficie plana en el suelo plantea dos fases: 1) deformación del suelo y; 2) transportación del suelo (Gutiérrez, 2010). En la fase de deformación, la superficie activa de la cuña actúa por una fuerza horizontal desplazando los distintos componentes del suelo que están en contacto con ella, dichos componentes se densifican produciendo tensión que aumenta de manera proporcional con el aumento de la deformación hasta que el prisma del suelo se comienza a destruir en un ángulo  $\alpha$ , rompiendo la conexión con las demás partes no alteradas del suelo (Figura 2).



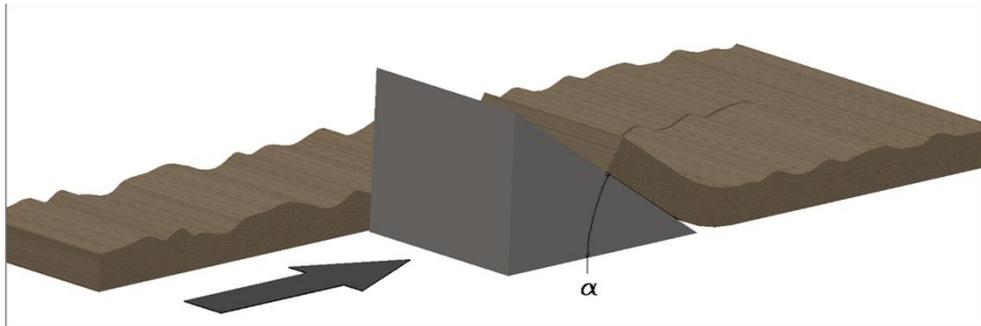
Adaptado de Gutiérrez, 2010.

### **Figura 2. Separación de fragmentos de suelo por la acción de la cuña.**

En la fase de transportación, la parte de suelo separada se desliza hacia arriba en la zona de trabajo de la cuña y sobre la superficie de la rotura producida por el agrietamiento, terminando cuando el trozo de suelo separado deja el canto superior, es decir, sube a una altura equivalente al espesor completo de la cuña (Gutiérrez, 2010).

La cuña en los instrumentos de labranza se presenta bajo dos formas de construcción que afectan la interacción del trabajo de ésta con el suelo (Gutiérrez, 2010):

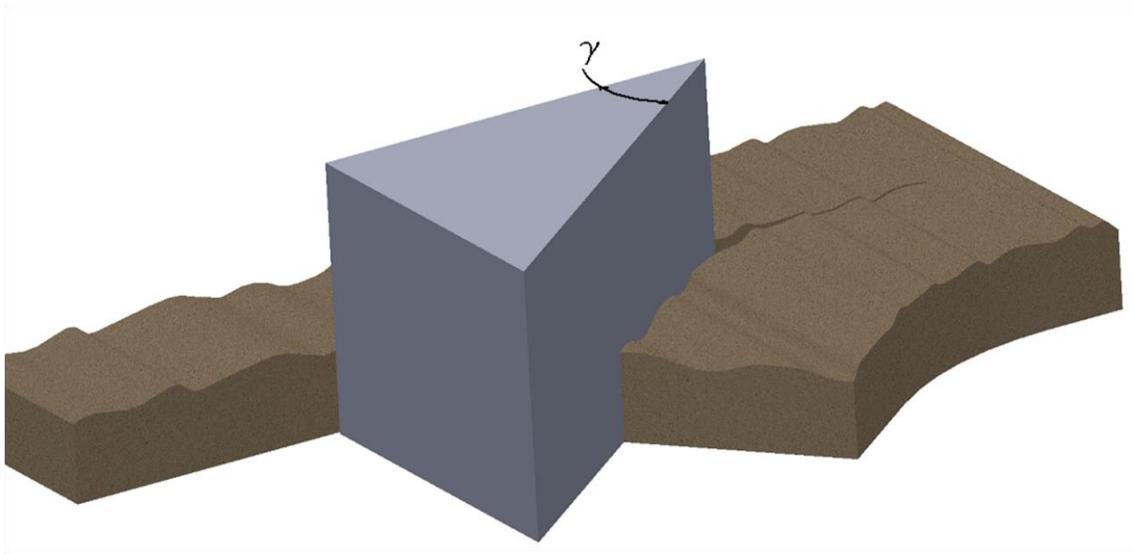
- a) Cuña de dos caras con ángulo  $\alpha$ , que separa la capa de suelo del fondo del surco, lo levanta y comprime en el plano vertical y lo desmenuza en pequeños pedazos (Figura 3).



Adaptado de Gutiérrez, 2010.

**Figura 3. Interacción de cuña de dos caras, también llamada de dos bordes.**

- b) Cuña de dos caras con ángulo  $\gamma$ , que separa la capa del suelo de la pared del surco, lo transporta y comprime en el plano horizontal (Figura 4).



Adaptado de Gutiérrez, 2010.

**Figura 4. Interacción de cuña de dos caras con ángulo  $\gamma$ .**

## **2.4. Determinación de algunas variables físicas del suelo mediante una máquina de ensayo mecánico**

El índice de la dureza del suelo o *IC*, puede determinarse también con una máquina de ensayo mecánico (o analizador de textura de alimentos) (Figura 5), mediante una prueba de penetración que también es un tipo de ensayo de compresión. En este tipo de ensayo, al penetrar una sonda el material se mide la profundidad o fuerza de penetración (Rosenthal, 2001). Recientemente, se ha simulado en laboratorio la respuesta del suelo al tránsito de maquinaria usando pruebas de compresión uniaxial (Dawidowski y Lerink, 1990; O'Sullivan, 1992), con la base de que el proceso de compactación está gobernado esencialmente por la compresión normal aplicada por los elementos de soporte de la maquinaria agrícola, más que por la compresión por confinamiento de las partículas en el suelo (Koolen, 1987).



Fuente: DIY Trade ©, 2011.

**Figura 5. Máquina de ensayo mecánico típica utilizada en análisis de materiales, especialmente de alimentos (Analizador de Textura).**

Otro tipo de ensayo corresponde al análisis de perfil de textura (TPA). Desarrollado originalmente por la “General Foods Corporation” para el análisis de la textura de alimentos, combina las medidas de cierto número de parámetros. En el TPA, la muestra se comprime dos veces, y el análisis de la curva fuerza-tiempo producida proporciona las figuras de dureza, cohesividad, elasticidad, adhesividad y fracturabilidad (fragilidad), entre otras (Rosenthal, 2001).

También el *principio de cuña* puede simularse con el analizador de textura de alimentos mediante una prueba de cortado. En esta prueba, el filo de una cuña forzado a través de un material puede propagar una grieta delante de dicho filo. La fuerza medida está formada por tres componentes: la fuerza necesaria para impulsar la cuña o instrumento de corte a través del material, el trabajo disipado en el recorte a medida que es deformado encima de la cuña (el recorte se tiene que retirar del camino para permitir el paso de la cuña), y la fricción entre la cuña y el material (Dobraszczyk y Vincent, 2001). El trabajo de cortado (en  $J \cdot m^{-2}$ ) se obtiene al dividir la fuerza (en N) por la anchura de la muestra (en m) (Ericsson y Lindbergh, 1996; Vincent, 1991).

## **2.5. Conceptos básicos de compactación del suelo**

La compactación se define como el aumento en la densidad aparente debido a un proceso de reestructuración de las partículas del suelo, que disminuye el espacio poroso e incrementa el contacto entre ellas (Soil Science Society of America, 1996). Según Ortiz-Cañavate y Hernanz (1989), la compactación es un proceso que genera una variación de volumen de suelo bajo la acción de fuerzas de compresión que pueden ser de origen de mecánico (paso de vehículos), o naturales (humectación-deseccación, impacto de las gotas de lluvia, etc.).

Cuando el suelo se somete a la acción de una carga de compresión lo suficientemente grande para originar un cambio de volumen, se encuentran cuatro causales (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989):

- a) Deformación debida a la compresión entre las partículas que integran la fase sólida.
- b) Compresión de la fase gaseosa.
- c) Variación del contenido de líquido y gas en el espacio poroso.
- d) Reordenación de las partículas sólidas.

Debido a que las fases sólida y líquida son relativamente incompresibles bajo la acción de una carga, las variaciones en el estado de compactación dependen principalmente de los cambios de posición de las partículas. Para suelos granulares no saturados de humedad, dichos cambios se efectúan por rodadura y deslizamiento entre partículas, mientras que para un estado de saturación dado, el factor que más incide en la variación de volumen, es el movimiento del agua en el interior de la masa de suelo. En general, puede establecerse que la reorganización de los componentes de

la fase sólida del suelo es consecuencia primeramente de una variación del volumen de huecos. En ensayos de compresión uniaxial sobre muestras de suelo, se han podido establecer relaciones de tipo empírico entre dicha variación de volumen (cuantificada por la porosidad, índice de huecos, o densidad aparente) y la presión hidrostática ejercida (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989).

Las fuerzas que originan la compactación se pueden clasificar en dos grupos (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989):

- 1) Internas.
- 2) Externas.

Las fuerzas *internas* se producen principalmente por los efectos de la humectación y desecación que se traducen respectivamente en un aumento del volumen del suelo debido a la hinchazón de las arcillas y a una posterior retracción. La alternancia de estos procesos hace que se origine una reorientación de las partículas del suelo y un desplazamiento de las mismas que ocupan poco a poco los espacios porosos.

Las fuerzas *externas* son aquellas que se aplican sobre la masa del suelo. Por su origen se distinguen dos tipos:

- a) Mecánicas.
- b) Naturales.

Las de origen *mecánico* fundamentalmente son debido a los vehículos agrícolas, máquinas no suspendidas, y aperos de labranza. Todo vehículo o máquina, a través de sus elementos de propulsión, ejerce sobre el suelo una serie de cargas que causan una deformación del mismo, así como un aumento de la densidad aparente que va disminuyendo en profundidad. La compactación originada por el tráfico de vehículos, u otro tipo de máquinas rodantes, depende entre otros factores de (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989):

- La carga aplicada.

- La superficie de contacto del neumático o cadena con el suelo.
- Tipo de suelo y humedad del mismo.

El tipo de suelo tiene una influencia importante sobre su capacidad de compactación, aquellos cuyo contenido de arcilla es medio o alto son los que más problemas pueden presentar. No obstante, la *humedad* es el factor que más incidencia directa tiene en el proceso de compactación. Un suelo estructurado y seco presenta un entramado rígido entre sus partículas que le confieren una importante resistencia a la deformación. Al ir aumentando la humedad, dicho entramado se debilita, de manera que al cargarlo sus partículas se reorientan y desplazan unas sobre otras haciendo que la porosidad disminuya. Esta porosidad queda reducida de forma permanente causando una serie de problemas para el desarrollo radicular una vez que el suelo se deseca, así como incrementando la dureza del suelo y disminuyendo su fertilidad física al minimizar el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, lo que ocasiona requerimientos adicionales de fertilización y un mayor costo de producción (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989; Hamza y Anderson, 2005).

Por otra parte, la compactación de origen *natural* es debida, entre otras causas, a la acción del ganado y al impacto de las gotas de lluvia. En el primer caso depende de la “carga ganadera”, es decir del número de cabezas por unidad de superficie, del peso de cada una de ellas, y de la superficie de apoyo sobre el suelo. Las gotas de lluvia influyen también en la compactación del suelo (Cuadro 3), ésta viene condicionada por la intensidad y tamaño de las gotas que influyen directamente sobre la energía de impacto (Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989).

**Cuadro 3. Influencia del tipo de lluvia sobre la energía de impacto.**

| Tipo de lluvia  | Intensidad (mm·h <sup>-1</sup> ) | Diámetro medio (mm) | Velocidad de caída (m·s <sup>-1</sup> ) | Gotas por m <sup>2</sup> y segundo | Energía específica de impacto W·m <sup>-2</sup> |
|-----------------|----------------------------------|---------------------|---|------------------------------------|---|
| Niebla          | 0.12                             | 0.09                | 0.03                                    | 6.2·10 <sup>-5</sup>               | 164·10 <sup>-10</sup>                           |
| Llovizna        | 0.25                             | 1.0                 | 4                                       | 140                                | 6·10 <sup>-4</sup>                              |
| Lluvia ligera   | 1                                | 1.25                | 4.7                                     | 260                                | 3.2·10 <sup>-3</sup>                            |
| Lluvia media    | 4                                | 1.6                 | 5.6                                     | 460                                | 1.7·10 <sup>-2</sup>                            |
| Lluvia fuerte   | 15                               | 2                   | 6.6                                     | 600                                | 1.5·10 <sup>-2</sup>                            |
| Tormenta fuerte | 100                              | 4                   | 8.7                                     | 1000                               | 1.12  |

Fuente: Ortiz-Cañavate y Hernanz, 1989.

## **2.6. Conceptos y objetivos de la labranza de suelos**

El trabajo realizado en el suelo con el propósito de alterar sus propiedades físicas y posibilitar a las plantas la expresión de todo su potencial se conoce como labranza del suelo. Las técnicas de labranza son utilizadas a fin de proporcionar una buena siembra y desarrollo de raíces, controlar malas hierbas, manejar los residuos de los cultivos, reducir la erosión, nivelar la superficie para el plantío, riego, drenaje, trabajos culturales y operaciones de cosecha, además de la incorporación de fertilizantes o pesticidas (Giasson, 2000).

Según Benites (1992), se pueden utilizar diferentes sistemas de clasificación de labranza. De acuerdo a la intensidad de laboreo se pueden clasificar en labranza convencional o tradicional, labranza de conservación o mínima y no labranza o labranza cero. Por la profundidad se pueden clasificar en labranza superficial y labranza profunda. Por la época de laboreo podría ser labranza de primavera o labranza de otoño. El manejo de residuos podría determinar una labranza “en limpio” o una labranza en protección de cobertura. De acuerdo a la forma del relieve después de la labranza se puede clasificar en labranza plana y labranza en caballones. La secuencia del laboreo determinaría una labranza primaria, secundaria y terciaria. Si se toma en cuenta la fuerza motriz utilizada se podrían considerar labranza a mano, labranza con tracción animal y labranza mecánica. El cultivo puede determinar labranzas específicas para arroz bajo riego, labranzas para cultivo de raíces o para cereales de grano pequeño. Por último, el ambiente agroclimático puede determinar sistemas de labranza para áreas de secano y labranza para áreas irrigadas.

Para fines prácticos, se considera clasificar la labranza en los siguientes sistemas (Benites, 1992):

- 1) Sistemas de labranza convencional (tradicional);
- 2) sistemas de labranza de conservación (mínima) y;
- 3) sistemas de no labranza o siembra directa (cero).

La labranza convencional se define como el conjunto de operaciones primarias y secundarias realizadas para preparar una cama de siembra para un cultivo dado, en una región geográfica determinada (Mannering y Fenster, 1983). Lo convencional es lo establecido en virtud de costumbres o precedentes. Se suele usar el término “tradicional” como sinónimo de aquellas

prácticas que son realizadas en una determinada región por la mayoría de los agricultores (Torcasso, 1992). La labranza de conservación es cualquier sistema de labranza y siembra que reduce la pérdida de suelo y agua en comparación con la labranza convencional, y que además retiene cantidades protectoras de residuos de cosecha en la superficie; después de la siembra debe haber por lo menos 30% de la superficie del suelo cubierta con residuos aportando así una reducción en la erosión por agua. La no labranza es un método de siembra que no requiere ninguna preparación de cama de siembra, con excepción de una adición de nutrientes y un método para abrir el suelo y colocar la semilla a la profundidad deseada. Generalmente se incluye un disco acanalado frente a la sembradora, y el ensamblaje de dos discos para abrir el surco y colocar las semillas (Naderman y Vieira, 1992).

### **III. Justificación**

El impacto del tránsito de tractores y maquinaria agrícola sobre la compactación del suelo a corto plazo, bajo labranza tradicional, particularmente en un *Vertisol*, característico de la principal zona productora de maíz del Estado de México, correspondiente al Valle Toluca - Atlacomulco, ha sido poco estudiado en México. Asimismo, se considera necesario el desarrollo de nuevas técnicas de laboratorio, que imiten las condiciones de campo, reduciendo el muestreo destructivo, y que resulten sensibles, confiables y apropiadas para cuantificar la compactación y su evolución, así como otras propiedades físicas del suelo.

Esta investigación pretende brindar información a los diversos interesados sobre la implementación de una técnica de laboratorio que, utilizando una metodología empleada en el análisis de textura de alimentos, cuantifique distintas variables físicas del suelo relacionadas con la compactación y otras propiedades, de una manera rápida y confiable. A su vez, también pretende informar a los productores de maíz de la región, en un sentido eminentemente práctico, sobre las ventajas de la adopción de sistemas de labranza alternos al tradicional, la cual implique una menor cantidad de pases del tractor y maquinaria agrícola, con la consiguiente disminución de costos y tiempos en la preparación del suelo y, que en última instancia, permita un manejo sostenible del recurso natural a la par que mantenga o incremente los rendimientos del cultivo.

## **IV. Hipótesis**

- Los sistemas de labranza de conservación mínima y cero, aplicados en un *Vertisol* a corto plazo, originan menor compactación que el sistema de labranza tradicional, así como un mayor rendimiento del cultivo de maíz.
- Los ensayos de compresión uniaxial en una máquina universal de prueba son suficientemente sensibles para determinar diferencias en la compactación de muestras de suelo de diferentes sistemas de labranza.

## V. Objetivos

### **General:**

Establecer el efecto de tres sistemas de labranza (tradicional, mínima y cero) sobre algunos indicadores de la compactación del suelo y su relación con el rendimiento del cultivo de maíz.

### **Específicos:**

- Evaluar el efecto de tres sistemas de labranza sobre la densidad aparente, resistencia a la penetración y velocidad de infiltración del agua en un *Vertisol*.
- Determinar la resistencia a la penetración, adhesividad, cohesividad y fuerza de corte, mediante una máquina universal de prueba, de un *Vertisol* sometido al efecto de tres sistemas de labranza.
- Evaluar el rendimiento (peso de grano) del cultivo de maíz bajo distintos sistemas de labranza en tres ciclos anuales consecutivos de cultivo.

## VI. Material y método

### 6.1. Descripción del sitio experimental

El estudio fue realizado durante los ciclos agrícolas primavera-verano (P-V) del periodo 2010-2013, 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 (19°24'43''N, 99°41'40''O, 2609 msnm) (Figura 6). El clima de la localidad se clasifica como templado sub-húmedo con lluvias en verano, con un rango anual de precipitación de 800 a 1500 mm y de temperatura de 4 a 14 °C (INEGI, 2009). Los sistemas de labranza se establecieron en un suelo clasificado como *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. Las condiciones de precipitación y temperatura durante el periodo experimental 2010 - 2012 se muestran en el Cuadro 8.



**Figura 6.** Área del campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México.

**Cuadro 4. Lámina de lluvia y temperatura media mensual 2010-2012 del área de estudio<sup>†</sup> y normales climatológicas<sup>††</sup>.**

| Mes        | Precipitación total (mm) |       |        |           | Temperatura media del aire (°C) |      |      |           |
|------------|--------------------------|-------|--------|-----------|---------------------------------|------|------|-----------|
|            | 2010                     | 2011  | 2012   | 1951-2010 | 2010                            | 2011 | 2012 | 1951-2010 |
| Enero      | 41.0                     | 0.0   | 10.0   | 14.0      | 9.1                             | 8.5  | 9.5  | 10.2      |
| Febrero    | 111.0                    | 0.0   | 79.0   | 8.7       | 9.8                             | 11.3 | 10.9 | 11.4      |
| Marzo      | 0.0                      | 1.0   | 23.0   | 12.1      | 12.4                            | 13.2 | 12.8 | 13.5      |
| Abril      | 9.0                      | 33.0  | 5.0    | 31.7      | 13.9                            | 15.9 | 13.2 | 15.2      |
| Mayo       | 25.0                     | 63.0  | 37.0   | 63.4      | 15.9                            | 16.9 | 15.0 | 16.0      |
| Junio      | 156.5                    | 190.0 | 233.0  | 139.3     | 16.2                            | 15.2 | 15.1 | 15.7      |
| Julio      | 273.0                    | 293.0 | 287.0  | 153.9     | 14.5                            | 14.0 | 14.3 | 14.7      |
| Agosto     | 143.0                    | 144.0 | 170.0  | 140.4     | 14.7                            | 14.0 | 14.4 | 14.6      |
| Septiembre | 127.0                    | 82.0  | 148.0  | 113.3     | 14.3                            | 13.6 | 14.5 | 14.6      |
| Octubre    | 5.0                      | 65.0  | 9.0    | 53.3      | 11.8                            | 11.8 | 12.8 | 13.6      |
| Noviembre  | 1.0                      | 39.0  | 18.0   | 10.5      | 9.9                             | 11.9 | 11.2 | 11.8      |
| Diciembre  | 0.0                      | 22.0  | 0.0    | 6.9       | 7.6                             | 10.5 | 9.0  | 10.7      |
| Anual      | 891.5                    | 932.0 | 1019.0 | 747.5     | 12.5                            | 13.1 | 12.7 | 13.5      |

<sup>†</sup>Estación meteorológica UAEM-FCA. <sup>††</sup>Estación meteorológica Toluca (DGE) (SMN, 2014).

## 6.2. Diseño experimental

El diseño experimental consistió en un arreglo de bloques completos al azar con tres repeticiones de los sistemas de labranza tradicional (LT), mínima (LM) y cero (LC), resultando en nueve parcelas de 12.8 x 10 m con 16 surcos a 0.8 m de distancia entre-surcos; cada parcela fue separada de otra por una calle de 8 m de ancho, considerada como área de maniobras de tránsito. Las operaciones y características de los aperos utilizados en cada sistema, se detallan en el capítulo de Resultados. Los sistemas de labranza fueron aplicados a las mismas parcelas cada año. El área experimental fue utilizada antes del 2010, para el cultivo de maíz, avena y trigo bajo LT por más

de 10 años. Los sistemas de labranza fueron establecidos desde el 2008 (con 0% de rastrojo para LT, 25% para LM y 100% para LC en cada ciclo agrícola), a fin de estudiar los efectos de la labranza y otras técnicas de producción en el cultivo de maíz, así como en la calidad del agua y suelo (Figuras 7 -10).



**Figura 7 (superior izquierda). Suelo del lote experimental. Figura 8 (superior derecha). Siembra y fertilización de parcela de labranza cero. Figura 9 (inferior izquierda). Pase de multiarado en parcela de labranza mínima. Figura 10 (inferior derecha). Pase de arado de disco en labranza tradicional.**

### **6.3. Propiedades químicas del suelo**

Previo al inicio de las operaciones de labranza en 2011, se obtuvieron muestras de suelo del área de estudio para determinar las condiciones de pH, capacidad de intercambio catiónico (*CIC*,  $\text{Cmol (+)} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), conductividad eléctrica (*CE*,  $\text{dS} \cdot \text{m}^{-1}$ ), nitrógeno total (*N*, %) y contenido de materia orgánica (*Mo*, %). Todas las muestras y variables fueron obtenidas y determinadas bajo los métodos propuestos por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002).

#### 6.4. Pruebas de compresión uniaxial

Las muestras de suelo para la prueba de compresión uniaxial de doble ciclo (CUD), fueron obtenidas del nivel superficial (0 – 150 mm) utilizando un “Soil Core Sampler” (50 x 150 mm, 2” x 6” model Signature Series, AMS, Inc., American Falls, Idaho, USA) (Figura 11), después de la operación de escarda en la huella del tractor para cada sistema en todas las parcelas (entre-surcos) (Figura 12). Después de obtenidas, las muestras fueron probadas bajo el principio *tal como están* empleando una Máquina Universal de Prueba (Stable Micro Systems TAX-T2, Stable Micro Systems Ltd., Godalming, Surrey, United Kingdom) con una celda de carga de 25 kg, de acuerdo al método propuesto por Gasca-Mancera y Casas-Alencáster (2007).

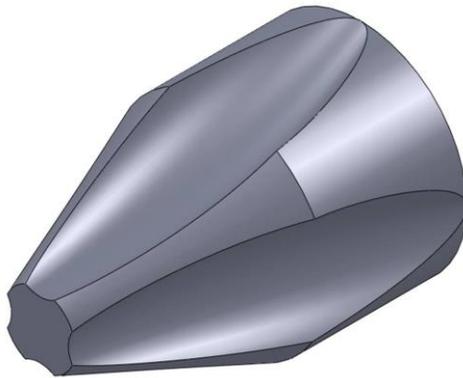


**Figura 11 (izquierda). “Soil Core Sampler”. Figura 12 (derecha). Toma de muestras con el “Soil Core Sampler” sobre la huella del tractor para su análisis en laboratorio.**

Los valores para dureza (N), adhesividad ( $N s^{-1}$ ) y cohesividad fueron obtenidos mediante dos ciclos de compresión de 2 mm de profundidad (1.3% de deformación relativa aparente relacionada con la altura original), utilizando una sonda cilíndrica de acrílico de 12.7 mm de diámetro a una velocidad de  $7 mm s^{-1}$  (Figura 13). Para medir la resistencia a la penetración ( $R_p$ ), las muestras de suelo fueron obtenidas de los horizontes superficial (0 – 150 mm) y subsuperficial (150 – 300 mm) empleando el “Soil Core Sampler” en la huella del tractor de cada parcela (entre-surcos) después de la operación de escarda de la LT. El instrumento empleado como sonda en la máquina universal de prueba fue un desarmador Phillips ® con un diámetro de 6.3 mm,  $186.01 mm^2$  de superficie de contacto y 150 mm de largo de varilla (Figuras 14 y 15). Las muestras obtenidas fueron sometidas a un ciclo de compresión de 50 mm a una velocidad de prueba de  $7 mm s^{-1}$ , con los resultados expresados en MPa.



**Figura 13. Sonda para la prueba de CUD montada en la máquina universal de prueba.**



**Figura 14 (izquierda). Representación de la punta de la sonda utilizada para la prueba de  $R_p$  en laboratorio. Figura 15 (derecha). Sonda de  $R_p$  montada en la máquina universal de prueba.**

### **6.5. Fuerza de corte**

Las muestras de suelo para la prueba de fuerza de corte ( $F_c$ ) fueron obtenidas del horizonte subsuperficial (150 – 300 mm), empleando el “Soil Core Sampler” en cada parcela después de la operación de escarda. La sonda utilizada para la prueba de  $F_c$  fue un destornillador plano (modelo DR-5/16x6BP, Truper Herramientas, México), con un diámetro de varilla de 7.9 mm y 150 mm de largo (Figura 16). Se realizó un corte en un extremo de los contenedores de las muestras (corte de 50 mm de longitud por 25 mm de ancho) para permitir, únicamente, la medición del componente

uniaxial, y los contenedores se dispusieron horizontalmente para simular la acción de una cuña de dos caras con ángulo  $\gamma$  (Figura 17). Las muestras fueron sometidas a un ciclo de compresión de 25 mm a una velocidad de ensayo de  $1.4 \text{ mm s}^{-1}$ , con los resultados expresados en N y joules (J) para el trabajo de corte. Las muestras de suelo de todos los sistemas de labranza fueron evaluadas para humedad (gravimétrica, %) de acuerdo con el método propuesto por Landeros y Serrato (2001), antes de las pruebas mecánicas de laboratorio.



**Figura 16 (izquierda). Representación de la punta de la sonda utilizada para la prueba de  $F_c$  en laboratorio. Figura 17 (derecha). Muestra dispuesta horizontalmente para la prueba de fuerza de corte.**

### **6.6. Densidad aparente**

La densidad aparente ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) se determinó bajo el método propuesto por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), mediante la obtención de tres muestras de suelo de cada parcela, a 15 y 30 cm de profundidad, previo al inicio de operaciones de labranza de cada ciclo agrícola.

### **6.7. Resistencia a la penetración (en campo)**

Para evaluar la dureza del suelo, 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 la presión aplicada en kPa, cada 2.5 cm, hasta una profundidad de 30 cm. Se tomaron un mínimo de tres lecturas del penetrómetro en la huella del tractor de cada parcela,

inmediatamente después de la operación de escarda del sistema de LT en cada ciclo agrícola. La determinación del *IC*, fue acompañada de la lectura de la humedad del suelo (*H<sub>o</sub>*, % volumétrica), obtenida con un medidor de humedad portátil (Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum ® Technologies, Inc; Aurora IL, USA), a 12 y 20 cm de profundidad.

### 6.8. Velocidad media de infiltración

La velocidad media de infiltración (*VMI*), se determinó en las parcelas de cada sistema, previo al inicio de operaciones de labranza en cada ciclo agrícola, de acuerdo con el método del infiltrómetro de doble cilindro propuesto por Anaya (1977) (Figura 18), y considerando la fórmula modificada de Porta *et al.* (1999):  $VMI = V(A \cdot t)^{-1}$ , donde *V* es volumen de agua (mL), *A* el área del cilindro interno (cm<sup>2</sup>) y *t* el tiempo de infiltración (min).



**Figura 18. Infiltrómetro de doble cilindro utilizado para determinar la velocidad media de infiltración del agua en el suelo.**

### **6.9. Rendimiento de grano**

Para evaluar el rendimiento, se estableció en las parcelas experimentales un cultivar de maíz híbrido (*Zea mays* L., cv. Aspros ® AS-722), bajo un arreglo de doble hilera y condiciones de secano, en la primera semana de abril de cada ciclo agrícola del periodo experimental. La densidad de siembra fue de 50 kg·ha<sup>-1</sup> con una distancia entre plantas de 0.15 m. El tratamiento de fertilización para todos los sistemas consistió de una dosis de 120-60-30 (N, P, K) unidades, aplicadas en la siembra. Como componente del rendimiento (Mg·ha<sup>-1</sup>), se consideró el peso de mil granos de la parcela útil (cuatro surcos centrales de 10 m de longitud), en cada ciclo agrícola.

### **6.10. Análisis estadístico**

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), empleando software SAS (Statistical Analysis System, USA). Todos los parámetros fueron analizados con un mínimo de tres repeticiones y probados por significancia entre tratamientos (P<0.05). Cuando se encontraron diferencias significativas, se utilizó la prueba de Tukey para determinar la diferencia entre medias.

## VII. Resultados

### 7.1. Capítulo propuesto para libro: “Tópicos Selectos de Horticultura y Manejo de Suelo”



Universidad Autónoma del Estado de México  
Facultad de Ciencias Agrícolas  
Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento  
*Cuerpo Académico Cultivos básicos y hortícolas*



Toluca, México a 7 de noviembre de 2014

**A quien corresponda**

Por este medio, quien suscribe, Dr. Omar Franco Mora, responsable ante la SEP y la UAEM del Cuerpo Académico Consolidado "Cultivos Básicos y Hortícolas" hago constar que los C.C. *Vaca-García, Víctor Manuel; Gutiérrez-Rodríguez, Francisco; González-Huerta, Andrés; Pérez-López, Delfina de Jesús; Franco-Mora, Omar y Castañeda-Vildózola, Álvaro* son los autores del manuscrito intitulado **Operaciones agrícolas mecanizadas y compactación del suelo: factores y soluciones**. Dicho documento obra en poder del CA en cuestión y es parte de la propuesta de libro denominado **TOPICOS SELECTOS DE HORTICULTURA Y MANEJO DE SUELO**. Este documento se encuentra en proceso de revisión por los editores designados por el CA y se espera sea sometido a la editorial de la UAEM el próximo año.

Se extiende la presente para los fines académicos que se consideren necesarios.

**ATENTAMENTE**

**Dr. OMAR FRANCO MORA**  
**PROFESOR INVESTIGADOR DE LA FCA/UAEMex**  
**LÍDER DEL CA DE CULTIVOS BÁSICOS Y HORTÍCOLAS**

c.cp. Archivo

# **Operaciones agrícolas mecanizadas y compactación del suelo: factores y soluciones**

**Víctor Manuel Vaca-García<sup>1</sup>, Francisco Gutiérrez-Rodríguez<sup>2</sup>, Andrés González-Huerta<sup>2</sup>,  
Delfina de Jesús Pérez-López<sup>2</sup>, Omar Franco-Mora<sup>2</sup>, Álvaro Castañeda-Vildózola<sup>2</sup>**

*<sup>1</sup>Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias 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. E-mail: vic.charger@gmail.com*

*<sup>2</sup>Centro 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. E-mail: fgrfca@hotmail.com, agonzalezh@uaemex.mx, djperezl@uaemex.mx, ofrancom@uaemex.mx, alvarocvl@hotmail.com*

## **1. Introducción**

La adopción de la agricultura intensiva a nivel mundial, la cual involucra ciclos de cultivo más cortos y frecuentes y el uso de maquinaria más pesada, ha originado un incremento en la compactación del suelo (Poesse, 1992). Mundialmente, la extensión de suelo compactado se estima, tan sólo por tránsito de maquinaria agrícola, en 68 millones de hectáreas (Flowers y Lal, 1998). La compactación se ha considerado como responsable de la degradación de 33 millones de ha de suelo en Europa (Akker y Canarache, 2001) y cerca de 4 millones de ha en Australia Occidental (Carder y Grasby, 1986).

La ingeniería de suelos define a la compactación como el proceso mediante el que las partículas del suelo son reacomodadas para disminuir el espacio poroso y colocarlas más cerca unas de otras, ocasionando un incremento de la densidad aparente. En un sentido agronómico, la compactación es el resultado de la aplicación al suelo de cualquier fuerza, por ejemplo, la ejercida por la labranza y el tránsito rodado de maquinaria agrícola, que incrementa la densidad aparente del suelo y, concurrentemente, disminuye la porosidad del mismo (Soil Science Society of America, 2013). La compactación del suelo también afecta a la mineralización del carbono y nitrógeno de la materia orgánica del suelo y del rastrojo (Neve y Hofman, 2000), así como a la concentración del dióxido de carbono en el suelo (Conlin y Driessche, 2000).

La compactación del suelo se asocia frecuentemente con un decremento en el rendimiento del cultivo, porque restringe el movimiento de agua, aire y raíces (Voorhes *et al.*, 1985). La compactación ha originado una disminución en el rendimiento entre 25 y 50% en algunas regiones de Europa (Eriksson *et al.*, 1974) y América del Norte, y entre 40 y 90% en países del oeste de África (Charreau, 1972; Kayombo y Lal, 1994). En Ohio, se reportaron decrementos en el rendimiento de los cultivos de 25% en maíz, 20% en soya y 30% en avena al término de un periodo de siete años (Lal, 1996). También en los Estados Unidos, se han estimado pérdidas económicas anuales en la producción agrícola, atribuibles a la compactación del suelo, de \$1200 millones de dólares (Gill, 1971).

Aunque la compactación del suelo se considera como el mayor problema ambiental originado por la agricultura convencional (McGarry, 2001), es el tipo de degradación más difícil de localizar y entender, principalmente porque no muestra marcas evidentes en la superficie del suelo. A diferencia de la salinización y la erosión, que proporcionan una fuerte evidencia superficial de la presencia de degradación de la tierra, la degradación de la estructura del suelo requiere de monitoreo físico y examinación antes de ser descubierta y, su extensión, naturaleza y causa, resueltas (Hamza y Anderson, 2005). La naturaleza oculta de la degradación estructural del suelo (*DES*), conlleva problemas específicos como, un pobre crecimiento del cultivo o infiltración del agua, que pudieran ser atribuidos a otras causas. Adicionalmente, a la *DES* puede señalársele como culpable por un pobre desempeño del cultivo cuando de hecho no está presente (Hamza y Anderson, 2005). Los productores agrícolas raramente relacionan sus prácticas de labranza con las causas de la *DES* y permanecen inadvertidos de que muchas de las prácticas de subsoleo la empeoran (McGarry y Sharp, 2001). En este sentido, debido a que la compactación del subsuelo es muy persistente y las posibilidades naturales o artificiales de su remediación han resultado decepcionantes, la Unión Europea la ha reconocido como una forma severa de degradación del suelo (Akker y Canarache, 2001).

Los efectos de la compactación sobre los cultivos y propiedades del suelo son complejos (Batey, 1990), y, debido a que el estado de la compactación es un importante atributo estructural del suelo, se tiene la necesidad de encontrar un parámetro para su caracterización, tal como la densidad relativa aparente, que proporciona, directamente, valores comparables para todos los suelos

(Håkansson y Lipiec, 2000). En virtud de que la densidad aparente representa la masa de suelo seco por unidad de volumen, establece entonces una relación clara entre la compactación del suelo y su capacidad para almacenar y transportar agua o aire. Por esta razón, la densidad aparente del suelo seco es el parámetro usado con mayor frecuencia para caracterizar el estado de la compactación (Panayiotopoulos *et al.*, 1994). Sin embargo, en suelos contraíbles/expandibles, la densidad aparente debería ser determinada a contenidos de humedad estandarizados, para prevenir problemas originados por las variaciones en el contenido de agua (Håkansson y Lipiec, 2000).

Hamza y Anderson (2005), consideran además otras propiedades físicas del suelo como principales parámetros para caracterizar la compactación. Estas corresponden a la dureza del suelo y a la infiltración de agua en el suelo. La dureza del suelo se usa como medida de la compactación porque refleja la resistencia del suelo a la penetración de raíces (Taylor, 1971; Mason *et al.*, 1988; Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Hamza y Anderson, 2001, 2003). En cuanto a la tasa de infiltración de agua en el suelo, ésta también puede ser usada para monitorear el estatus de la compactación, especialmente de la capa superficial, ya que el agua infiltra suelos no compactados que tienen partículas de suelo bien agregadas mucho más rápido que suelos pesados, con menor estructura (Hamza y Anderson, 2002, 2003).

Bouwman y Arts (2000), sostienen que un ligero grado de compactación superficial puede ser benéfico para algunos tipos de suelo, indicando que existe un nivel óptimo de compactación (*NOC*) para el crecimiento del cultivo. Especialmente en sistemas de tránsito controlado, el concepto de *NOC* es importante, ya que en esos sistemas se evita cualquier fuente externa que pueda causar un nivel de compactación menor al óptimo y decrementos en el rendimiento del cultivo. A su vez, si la compactación se confina solamente a la subsuperficie, las raíces pueden crecer más lateralmente o curvarse hacia arriba a capas menos compactadas sin un decremento significativo en el rendimiento (Rosolem y Takahashi, 1998).

Este capítulo hace referencia, principalmente, a operaciones mecanizadas de distintos sistemas de labranza bajo condiciones de temporal. Considera como base las investigaciones presentadas en la revisión de literatura de Hamza y Anderson (2005).

## 2. Principales factores de la compactación del suelo

### 2.1. Influencia del contenido de agua del suelo

El factor con mayor influencia en los procesos de compactación del suelo es el contenido de agua del suelo (Soane y Van Ouwerkerk, 1994). En todos los niveles de compactación, la resistencia a la penetración se incrementa al disminuir el potencial del agua del suelo (Lipiec *et al.*, 2002). En otras palabras, al incrementar el contenido de humedad del suelo se origina una reducción en su capacidad de soporte (Kondo y Dias Junior, 1999), y, por tanto, una disminución en la presión admisible del terreno (Medvedev y Cybulko, 1995). Conocer los cambios en la compactación del suelo con los cambios del contenido de agua, ayuda a programar el tránsito de maquinaria y operaciones afines al cultivo a un nivel de humedad apropiado (Ohu *et al.*, 1989). Debido a que la deformación del suelo se incrementa con el contenido de humedad y el número de pasadas de maquinaria (Bakker y Davis, 1995), se considera importante realizar el laboreo del suelo a la humedad correcta si se desea minimizar la compactación (Hamza y Anderson, 2005). Gysi *et al.* (1999), reportaron que el suelo húmedo, a una profundidad de 12 a 17 cm, respondió a una presión de contacto de 160 kPa con incrementos en presión de consolidación y densidad aparente, así como con un decremento en la permeabilidad del aire y la macroporosidad. Sin embargo, al aplicar una presión de contacto de 130 kPa, sólo se detectaron ligeros cambios de la estructura del suelo a profundidades de 32 a 37 y 52 a 57 cm, donde las mediciones no indicaron ninguna compactación. A pesar de esto, en suelos con baja humedad, la labranza “simplificada” no tuvo influencia en la densidad del suelo hasta 30 cm de profundidad (Weber *et al.*, 2000).

La compactación y humedad del suelo, son sólo significativas cuando se comparan suelos de la misma profundidad, ya que una variación considerable entre profundidades del mismo perfil, y, entre perfiles, hacen difícil la comparación de resultados (Quiroga *et al.*, 1999). Para cualquier nivel de energía de compactación, resulta necesario definir el contenido de humedad del suelo correspondiente a sus límites sólido, plástico y líquido (Quiroga *et al.*, 1999). Estos límites dependen del contenido de arcilla y de sus características mineralógicas. Una humedad del suelo inferior a su límite plástico (*LP*) es deseable para las operaciones de cultivo (Spoor and Godwin, 1978), considerándose un valor de 0.95 *LP* el más apropiado (Allmaras *et al.*, 1969).

A un elevado nivel de humedad del suelo, la diferencia en la resistencia entre un suelo compactado (con tránsito) y uno no-compactado (sin tránsito), es baja y usualmente menor que el valor que limita el crecimiento de raíces ( $>2$  MPa). No obstante, conforme el suelo se seca, la compactación en la superficie se vuelve observable (Silva *et al.*, 2000). Los datos reportados por Medvedev y Cybulko (1995), indican que a un bajo contenido de agua, incluso cargas máximas no deformaron el suelo más de 2 cm de profundidad, mientras que, a un nivel más alto de contenido de agua, el valor de la carga admisible (la carga que no causa compactación significativa del suelo) fue apreciablemente más bajo. Esto significa que para permitir una producción satisfactoria del cultivo, la máxima presión admisible del terreno de vehículos agrícolas, disminuye a la par del valor de la densidad aparente en combinación con el aumento de la humedad del suelo. En resumen, para una carga externa dada, la compactación se eleva con el incremento de humedad del suelo. También, cuando la frecuencia del tránsito mecanizado disminuye, el factor de compactación se minimiza y este decremento es más gradual en un suelo mojado que en un suelo seco, sin embargo, el incremento en la compactación con el incremento de humedad del suelo es válido hasta un cierto valor conocido como contenido óptimo de humedad, valor sobre el cual, bajo una carga dada, el incremento en el contenido de humedad resulta en decrementos en la compactación en correspondencia a que el suelo se vuelve más plástico e incompresible (Hamza y Anderson, 2005).

## *2.2. Operaciones mecanizadas*

El tránsito rodado de maquinaria es común en la mayoría de las operaciones agrícolas, aún en sistemas de labranza cero (Tullberg, 1990). La labranza, cosecha y aplicación de químicos o fertilizantes son las operaciones comunes en la mayoría de los sistemas de producción agrícola. La mayor parte de estas operaciones, si no su totalidad, es desarrollada por maquinaria rodada de gran peso. La compactación del suelo por tránsito rodado, está caracterizada por un decremento en la porosidad del suelo bajo la huella de rodamiento (Hamza y Anderson, 2005).

El grado de compactación depende de los siguientes factores: resistencia mecánica del suelo, condicionada por propiedades intrínsecas como la textura y contenido de materia orgánica (Larson *et al.*, 1980; Hettiaratchi, 1987); estructura de la capa cultivada durante el rodamiento (Horn *et al.*, 1994) y su estatus de agua (Guérif, 1984), y; carga, subordinada a la carga del eje, dimensiones

y velocidad de los neumáticos, así como a la interacción suelo-neumático (Lebert *et al.*, 1998). Diversas investigaciones han estimado que, aún en sistemas genuinos de labranza cero (una pasada de maquinaria a la siembra), cerca de 30% de la superficie del suelo es transitada por los neumáticos de maquinaria pesada (Tullberg, 1990). Bajo labranza mínima (2 a 3 pasadas), el porcentaje puede exceder 60% y, en labranza tradicional (múltiples pasadas), excedería 100% durante un ciclo de cultivo (Soane *et al.*, 1982). El tránsito y labranza con maquinaria pesada también pueden, en diferentes tipos de suelo y condiciones climáticas, inducir compactación del subsuelo en los sistemas de cultivo (Raper *et al.*, 1998; Mosaddeghi *et al.*, 2000). La profundidad de la compactación varía ampliamente de 10 a 60 cm (Flowers y Lal, 1998), pero es más obvia en la superficie del suelo (alrededor de 10 cm). Sin embargo, pueden presentarse incrementos entre 16 y 76% del índice de cono (lectura del penetrómetro) y de la densidad aparente en los primeros 40 cm de la capa superficial, aunque, Balbuena *et al.*, (2000), reportaron que los incrementos se limitaron a una profundidad de 15 cm. En contraste, Jorajuria y Draghi (2000), no encontraron diferencias entre cargas ligeras y pesadas en el rango de menor profundidad (superficial), en una condición de pastizal.

Wiermann *et al.* (2000), estudiaron el efecto a largo plazo de la labranza reducida sobre las propiedades de resistencia de un suelo franco limoso en Alemania. Sus resultados sostienen que el repetido impacto profundo de las herramientas de labranza en lotes tratados convencionalmente, provocó una destrucción permanente de los agregados del suelo recién formados. Esto condujo a una relativamente débil estructura de los horizontes de labranza del suelo, ya que cargas dinámicas tan bajas como 2.5 t indujeron una degradación estructural. En cambio, en los lotes de labranza de conservación, un solo rodamiento de 2.5 t fue compensado por un robusto sistema de agregados, y no condujo a degradación estructural. Por tanto, la labranza reducida facilitó una mayor resistencia del suelo debida a un robusto sistema de agregados. El incremento de las cargas rodadas y pasadas repetidas, resultó en una mayor degradación estructural del subsuelo en ambos sistemas de labranza. Benito *et al.* (1999), investigaron los efectos de la labranza tradicional, labranza mínima y no-labranza sobre el agua, materia orgánica y compactación del suelo. Encontraron que el tratamiento de no-labranza conservó mucha más agua que los tratamientos de labranza tradicional y mínima, especialmente en años secos. La compactación del suelo fue menor en la labranza tradicional, pero se presentó mayor compactación en el subsuelo después de la

cosecha, resultando entonces en mayor compactación que en la no-labranza, además, el nivel de materia orgánica se incrementó después de los tratamientos de labranza mínima y no-labranza. A pesar de lo anterior, algunos productores prefieren la labranza mínima o la convencional sobre la no-labranza, argumentando que dichos tipos de labranza, pudieran proveer de condiciones físicas del suelo más favorables para el crecimiento del cultivo, en comparación con la no-labranza (Tormena *et al.*, 2002), y que los valores críticos más allá de los cuales la penetración de raíces se restringe severamente ( $>2$  MPa), fueron observados principalmente en el sistema de no-labranza (Silva *et al.*, 2000).

Si las operaciones agrícolas se desarrollan cuando el suelo está seco a muy seco, la compactación puede ser minimizada significativamente (Hamza y Anderson, 2005). En otro sentido, el tránsito de maquinaria al azar puede compactar severamente al suelo, reducir la infiltración e incrementar el consumo de energía (Li Hong Wen *et al.*, 2000). No obstante, se considera que bajo cualquier superficie donde opere tránsito rodado, se requiere el uso de la labranza para regresar al suelo a una baja impedancia para la exploración de raíces y a un estado conductivo para la infiltración del agua (Carter *et al.*, 1991). El suelo manejado sin tránsito vehicular o labranza durante la siembra es estable, con baja impedancia y mayor infiltración del agua que un suelo con lotes transitados y de laboreo. La adopción de estos descubrimientos también reducirían los costos unitarios de producción del cultivo (Carter *et al.*, 1991).

### **3. Soluciones a los problemas de compactación del suelo**

Ya que la compactación disminuye principalmente la porosidad del suelo (o incrementa su densidad aparente), una clara manera de reducir o eliminar la compactación del suelo es incrementando su porosidad (o disminuyendo su densidad aparente) (Hamza y Anderson, 2005). El manejo de la compactación del suelo puede ser alcanzado por medio de la correcta aplicación de algunas o todas de las siguientes técnicas (correspondientes en gran medida a los principios y prácticas de la labranza de conservación) (FAO, 2003): a) adición de materia orgánica; b) tránsito controlado; c) aflojamiento mecánico como la roturación profunda y; d) la selección de una rotación que incluya cultivos y pastos con raíces pivotantes fuertes, capaces de penetrar y fragmentar suelos compactados (Hamza y Anderson, 2005). Mitchell y Berry (2001), afirman que las técnicas mejoradas de manejo del terreno, son vitales para el aseguramiento de que las

condiciones físicas del suelo no estén comprometidas, y para el fomento de las prácticas que incrementen la materia orgánica, reduzcan la labranza y utilicen la tierra agrícola de manera sostenible.

### *3.1. Compactación y materia orgánica*

La materia orgánica ayuda al suelo a “rebotar” en contra de la compactación mediante la retención de agua. El mantener una adecuada cantidad de materia orgánica en el suelo, estabiliza su estructura y lo hace más resistente a la degradación (Cochrane y Aylmore, 1994; Thomas *et al.*, 1996), además, disminuye su densidad aparente y resistencia (Sparovek *et al.*, 1999; Carter, 2002). En cuanto al tipo de materia orgánica, la rápidamente oxidable parece ser más relevante que la materia orgánica total en la determinación del comportamiento mecánico del suelo (Ball *et al.*, 2000). Por otra parte, una menor humificación de la materia orgánica, tiene como efecto el incremento de la porosidad del agregado y por ende, un mayor decremento en la resistencia a la tracción del mismo (Zhang, 1994). Debido a que los materiales orgánicos poseen una menor densidad aparente y mayor porosidad en comparación con los suelos minerales (Martin y Stephens, 2001), su incorporación al suelo mejoraría su porosidad y densidad aparente (Zhang, 1994).

La adición de materia orgánica al suelo superficial, a través de la incorporación de rastrojo o aplicación de estiércol, ha sido ampliamente estudiada, pero su adición para mejorar la compactación del subsuelo es poco común debido a razones técnicas y económicas (Hamza y Anderson, 2005). Aunque el rastrojo es una fuente común de materia orgánica del suelo, el estiércol animal también es utilizado ampliamente por los productores para reducir la compactación del suelo y mejorar su fertilidad (Hamza y Anderson, 2005). La elasticidad del estiércol, previene la transmisión de esfuerzos hacia el subsuelo a profundidades mayores (Soane, 1990), actuando de ésta manera como un regulador para disminuir el impacto de la maquinaria agrícola en el subsuelo. Mosaddeghi *et al.* (2000), mostraron que la incorporación de 50 y 100 t·ha<sup>-1</sup> de estiércol vacuno, contrarrestó significativamente los efectos de carga (0.06 y 0.08 PL) en la densidad aparente y resistencia de un suelo franco arcillo limoso.

### 3.2. *Tránsito controlado*

El tránsito controlado de maquinaria agrícola, es un sistema que podría ayudar a mantener una zona más favorable para el crecimiento de plantas, mediante la restricción de la compactación del suelo a las líneas de tránsito (Braunack *et al.*, 1995), por ende facilitando una línea de tránsito firme y una zona de enraizamiento suelta (Kayombo y Lal, 1993). El tránsito controlado posibilita el manejo a largo plazo de la compactación inducida por tránsito (Taylor, 1992), evita la compactación del suelo inducida por maquinaria y permite la optimización de las condiciones del suelo tanto para neumáticos como para cultivos (Taylor, 1989). Sin embargo, antes de la implementación del tránsito controlado, el suelo debe ser aflojado con el fin de remover cualquier capa compactada (Hamza y Anderson, 2005). Con respecto al comportamiento del agua, bajo un sistema de cero-labranza con tránsito controlado, la tasa de infiltración del agua en el suelo es similar a la de un suelo virgen (Li YuXia *et al.*, 2001), no obstante, si el suelo es trabajado por un tractor de tamaño medio, la tasa de infiltración puede reducirse a la de un suelo cultivado por largo plazo (Hamza y Anderson, 2005). Esto sugiere que el tránsito rodado, más que la labranza y el cultivo, podría ser el principal factor que gobierna la infiltración. También significa que la exclusión del tránsito rodado bajo un sistema de producción de tránsito controlado, combinado con agricultura de conservación, provee una manera de incrementar la sostenibilidad del cultivo y mejorar la infiltración, incrementa el agua disponible para la planta y reduce la erosión del suelo causada por escorrentía (Hamza y Anderson, 2005). En otro sentido, a pesar de que las huellas de la rodada pueden ocupar 20% del terreno, las pérdidas en ésta área pueden ser compensadas por un rendimiento más alto del cultivo (Li Hong Wen *et al.*, 2000).

A pesar de las muchas ventajas reportadas para el tránsito controlado, algunos investigadores son todavía críticos del concepto, argumentando que este sistema no ha resultado en un marcado beneficio en las propiedades del suelo o el rendimiento del cultivo (Braunack *et al.*, 1995).

### 3.3. *Compactación y roturación profunda*

La roturación profunda o subsoleo, se ha convertido en una técnica común de manejo usada para fragmentar horizontes densos subsuperficiales del suelo, que limitan la percolación del agua y la penetración de raíces (Bateman y Chanasyk, 2001). Henderson (1991), sostiene que la roturación profunda de un suelo arenoso compactado, incrementó cerca de 30% la materia seca de todas las

especies sometidas a prueba en etapa de floración, en comparación con la de suelos no alterados y, en otro resultado, Hamza y Anderson (2003), reportan que el subsoleo, en combinación con la aplicación de cal agrícola, aumentó significativamente el rendimiento de trigo y leguminosas en suelos franco-arenosos y franco-arcillo-arenosos. La roturación profunda también puede mejorar la salud del suelo y la habilidad de las plantas para resistir enfermedades (Laker, 2001). Pese a lo mencionado, un inconveniente de ésta operación es que la condición resultante de suelo abierto es particularmente vulnerable a la recompactación por el tránsito subsecuente de maquinaria y el pacer del ganado (Spoon, 1995). Para prevenir la recompactación y ayudar a reformar la estructura del suelo roturado, se requiere la ayuda de un agente adhesivo o floculante (cal o materia orgánica) (Hamza y Anderson, 2003).

La roturación del suelo es el componente más costoso y crítico de la remoción de la compactación por medios físicos (Hamza y Anderson, 2005), sin embargo, la selección de una humedad del suelo apropiada (Hamza y Penny, 2002), así como de una correcta combinación entre la profundidad de roturación y el espaciamiento de las puntas del subsolador, puede minimizar su costo. También se considera necesario, antes de la siembra, permitir el asentamiento del suelo roturado, de lo contrario es difícil controlar la profundidad de siembra y las semillas podrían colocarse a mayor profundidad que la preestablecida (Hamza y Anderson, 2005).

#### *3.4. Compactación y raíces de plantas*

La habilidad de las raíces de plantas para penetrar el suelo se restringe a medida que éste incrementa su resistencia (Mason *et al.*, 1988), y cesa completamente a 2.5 kPa (Taylor, 1971). El efecto de las raíces sobre la estructura del suelo, depende de la especie cultivada, la constitución del suelo y los factores ambientales (Monroe y Kladviko, 1987). Éste efecto también se ve influenciado por la micro-flora del suelo asociada con las raíces de las plantas (Tisdall, 1991).

Los cambios diurnos en el diámetro de la raíz, aflojan y rompen cualquier capa compactada del suelo a su alrededor (Hamza y Anderson, 2005). Las raíces de diferentes especies cultivadas, así como de las variedades de una misma especie, difieren considerablemente en su habilidad para penetrar a través de capas duras del suelo (Singh y Sainju, 1998). Las especies de plantas que tienen la habilidad de penetrar suelos con gran fuerza, usualmente poseen un sistema de raíz pivotante profundo. La incorporación de dichas especies en la rotación de cultivos es deseable

para minimizar los riesgos de la compactación del subsuelo (Ishaq *et al.*, 2001). Por último, las raíces se concentrarán en el suelo superficial si éste se presenta de manera suficiente para su crecimiento y los incrementos en la densidad del subsuelo podrían no dar como resultado decrementos significativos en el rendimiento (Rosolem y Takahashi, 1998).

#### **4. Conclusión**

La compactación del suelo ocasionada por la agricultura intensiva, afecta de manera adversa la fertilidad física del suelo, particularmente al almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, mediante el incremento de la densidad aparente y resistencia y el decremento de la porosidad, infiltración del agua y capacidad de retención de agua del suelo. A fin de mitigar o retardar el problema, se sugiere una combinación de prácticas que incluyan: cero o mínima labranza, tránsito controlado, aflojamiento del suelo compactado mediante la roturación profunda acompañada de un agente aglutinador como la cal para retardar el proceso de recompactación y, utilizar una rotación de cultivos que incluya plantas con raíces profundas y fuertes capaces de penetrar suelos relativamente compactados. Finalmente, las operaciones agrícolas deben realizarse a la mínima humedad aceptable del suelo necesaria para el desarrollo de las mismas. Todas las demás operaciones que no requieran humedad en el suelo, debieran ser realizadas cuando el suelo está seco a muy seco.

## Literatura citada

- Akker, J.J.H. and Canarache, A. 2001. Two European concerted actions on subsoil compaction. *Landnutzung und Landentwicklung*. 42:15-22.
- Allmaras, R.R.; Burwell, R.E. and Holt, R.F. 1969. Plow layer porosity and surface roughness from tillage as affected by initial porosity and soil moisture at tillage time. *Soil Science Society of America Proceedings*. 31:550-556.
- Bakker, D.M. and Davis, R.J. 1995. Soil deformation observations in a Vertisol under field traffic. *Australian Journal of Soil Research*. 33:817-832.
- Balbuena, R.H.; Terminiello, A.M.; Claverie, J.A.; Casado, J.P. and Marlats, R. 2000. Soil compaction by forestry harvester operation. Evolution of physical properties. *Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental*. 4:453-459.
- Ball, B.C.; Campbell, D.J. and Hunter, E.A. 2000. Soil compactibility in relation to physical and organic properties at 156 sites in UK. *Soil & Tillage Research*. 57(2000):83-91.
- Bateman, J.C. and Chanasyk, D.S. 2001. Effects of deep ripping and organic matter amendments on Ap horizons of soil reconstructed after coal strip-mining. *Canadian Journal of Soil Science*. 8:113-120.
- Batey, T. 1990. Control of compaction on the farm. A personal view. *Soil Technology*. 3:225-229.
- Benito, A.; Sombrero, A. y Escribano, C. 1999. The effect of conservation tillage on soil properties. *Agricultura, Revista Agropecuaria*. 68:538-541.
- Bouwman, L.A. and Arts, W.B.M. 2000. Effects of soil compaction on the relationships between nematodes, grass production and soil physical properties. *Applied Soil Ecology*. 14:213-222.
- Braunack, M.V.; McPhee, J.E. and Reid, D.J. 1995. Controlled traffic to increase productivity of irrigated row crops in the semi-arid tropics. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 35:503-513.
- Carder, J. and Grasby, J. 1986. A framework for regional soil conservation treatments in the medium and low rainfall agricultural district. Western Australia. Department of Agriculture, Research Report. 1(86). 120 p.
- Carter, L.M.; Meek, B.D. and Rechel, E.A. 1991. Zone production system for cotton, soil response. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 34:354-360.
- Carter, M.R. 2002. Soil quality for sustainable land management: organic matter and aggregation interactions that maintain soil functions. *Agronomy Journal*. 94:38-47.
- Charreau, C. 1972. Problemes poses par l'utilisation agricole des sols tropicaux par des cultures annuelles. *Agronomie Tropicale*. 27:905-929
- Cochrane, H.R. and Aylmore, L.A.G. 1994. The effects of plant roots on soil structure. *In: Proceedings of 3rd Triennial Conference "Soils 94"*. 207-212 pp.

- Conlin, T.S.S. and Driessche, R. 2000. Response of soil CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in central British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*. 80:625-632.
- Eriksson, J.; Hakansson, I. and Danfors, B. 1974. The effect of soil compaction on soil structure and crop yields. Swedish Institute of Agricultural Engineering. Uppsala. Bulletin 354.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2003. Soil Compaction An unnecessary form of land degradation. FAO and the University of Teramo. Rome, Italy. Leaflet.
- Flowers, M. and Lal, R. 1998. Axle load and tillage effect on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil & Tillage Research*. 48(1998):21-35.
- Gill, W.R. 1971. Economic assessment of soil compaction. ASAE Monograph. St. Joseph.
- Guérif, J. 1984. The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 29:367-374.
- Gysi, M.; Ott, A. and Fluhler, H. 1999. Influence of single passes with high wheel load on a structured, unploughed sandy loam soil. *Soil & Tillage Research*. 52(1999):141-151.
- Håkansson, I. and Lipiec, J. 2000. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Tillage Research*. 53(2000):71-85.
- Hamza, M.A. and Anderson, W.K. 2001. Effect of competition between gypsum, potassium, iron and sulphur on lupin. 2nd Australia-New Zealand Conference on Environmental Geotechnics. 28-30 November, 2001. Newcastle, Australia. 95-97 pp.
- Hamza, M.A. and Anderson, W.K. 2002. Improving soil fertility and crop yield on a clay soil in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*. 53:615-620.
- Hamza, M.A. and Anderson, W.K. 2003. Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Australian Journal of Agricultural Research*. 54:273-282.
- Hamza, M.A. and Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*. 82(2005):121-145.
- Henderson, C.W.L. 1991. Sensitivity of eight cereal and legume species to the compaction status of deep, sandy soils. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 31:347-355.
- Hettiaratchi, D.R.P. 1987. A critical state soil mechanics model for agricultural soils. *Soil Use Management*. 3:94-105.
- Horn, R.; Richards, B.G.; Grasse, W.; Baumgartl, T. and Wiermann, C. 1998. Theoretical principles for modeling soil strength and wheeling effects-a review. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*. 161:333-346.

- Ishaq, M.; Ibrahim, M.; Hassan, A.; Saeed, M. and Lal, R. 2001. Subsoil compaction effects on crops in Punjab, Pakistan: II. Root growth and nutrient uptake of wheat and sorghum. *Soil & Tillage Research*. 60(2001):153-161.
- Jorajuria, D. y Draghi, L. 2000. Sobrecompactación del suelo agrícola. Parte I: influencia diferencial del peso y del número de pasadas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 4:445-452.
- Kayombo, B. y Lal, R. 1993. Tillage systems and soil compaction in Africa. *Soil & Tillage Research*. 27(1993):35-72.
- Kayombo, B. y Lal, R. 1994. Response of tropical crops to soil compaction. *In: Soil Compaction in Crop Production*. Sloane, B.D. and Van Ouwerkerk. (eds.). Elsevier. Amsterdam. 287–315 pp.
- Kondo, M.K. and Dias Junior, M. S. 1999. Soil compressibility of three latosols as a function of moisture and use. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 23:211-218.
- Laker, M.C. 2001. Soil compaction: effects and amelioration. Proceedings of the 75th Annual Congress of the South African Sugar Technologists' Association, 31 July – 3 August 2001. Durban, South Africa. 125-128 pp.
- Lal, R. 1996. Axle load and tillage effects on soil degradation and rehabilitation in Western Nigeria. I. Soil physical and hydrological properties. *Land Degradation Review*. 7:19-45.
- Larson, W.E.; Gupta, S.C. and Useche, R.A. 1980. Compression of agricultural soils from eight soil orders. *Soil Science Society of America Journal*. 44:450-457.
- Lebert, M.; Burger, N. and Horn, R. 1998. Effect of dynamic and static loading on compaction of structured soils. *In: Mechanics and Related processes in Structured Agricultural Soils*. Larson, W.E; Blake, G.R.; Allmaras, R.P.; Voorhees, W.B. and Gupta, S. (eds.). NATO ASI Series, Applied Science, Kluwer Academic Publisher. Dordrecht, Netherland. 73-80 pp.
- Li Hong Wen; Gao HuanWen; Chen JunDa; Li Wen Ying and Li RuXin. 2000. Study on controlled traffic with conservative tillage. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*. 16:73-77.
- Li YuXia, Tullberg, J.N. and Freebairn, D.M. 2001. Traffic and residue cover effects on infiltration. *Australian Journal of Soil Research*. 39:239-247.
- Lipiec, J.; Ferrero, A.; Giovanetti, V.; Nosalewics, A. and Turski, M. 2002. Response of structure to simulated trampling of woodland soil. *Advances in Geoecology*. 35:133-140.
- Martin, P.J. and Stephens, W. 2001. The potential for biomass production on restored landfill caps. *In: Aspects of Applied Biology*. Bullard, M.J.; Christian, D.G.; Knight, J.D.; Lainsbury, M.A. and Parker, S.R. (eds.). 65. 337-344 pp.
- Mason, E.G.; Cullen, A.W.J. and Rijkse, W.C. 1988. Growth of two *Pinus radiata* stock types on ripped and ripped/bedded plots at Karioi forest. *New Zealand Journal of Forestry Science*. 18:287-296.

- Mitchell, F.J. and Berry, W.A.J. 2001. The effects and management of compaction in agricultural soils. Proceedings of the Annual Congress-South African Sugar Technologists' Association. No. 75. 118-124 pp.
- McGarry, D. 2001. Tillage and soil compaction. *In: First World Congress on Conservation Agriculture.* García-Torres, L.; Benítez, J. and Martínez-Vilela, A. (eds.). 1-5 October 2001. Natural Resource Sciences. Madrid, Spain. 281-291 pp.
- McGarry, D. and Sharp, G. 2001. A rapid, immediate, farmer-usable method of assessing soil structure condition to support conservation. *In: First World Congress on Conservation Agriculture.* García-Torres, L.; Benítez, J. and Martínez-Vilela, A. (eds.). 1-5 October 2001. Natural Resource Sciences. Madrid, Spain. 209-214 pp.
- Medvedev, V.V. and Cybulko, W.G. 1995. Soil criteria for assessing the maximum permissible ground pressure of agricultural vehicles on Chernozem soils. *Soil & Tillage Research.* 36(1995):153-164.
- Monroe, C.D. and Kladvko, E.J. 1987. Aggregate stability of a silt loam as affected by roots of maize, soybean and wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 18:1077-1087.
- Mosaddeghi, M.R.; Hajabbasi, M.A.; Hemmat, A. and Afyuni, M. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil & Tillage Research.* 55:87-97.
- Neve, S. and Hofman, G. 2000. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues. *Biology and Fertility of Soils.* 30:544-549.
- Ohu, J.O.; Folorunso, O.A.; Aeiniji, F.A. and Raghavan, G.S.V. 1989. Critical moisture content as an index of compactibility of agricultural soils in Borno State of Nigeria. *Soil Technology.* 2:211-219.
- Panayiotopoulos, K.P.; Papadopoulou, C.P. and Hatjioannidou, A. 1994. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil & Tillage Research.* 31:323-337.
- Poesse, G.J. 1992. Soil compaction and new traffic systems. *In: Possibilities Offered by New Mechanization Systems to Reduce Agricultural Production Costs.* Pellizzi, G.; Bodria, L.; Bosma, A.H.; Cera, M.; Baerdemaeker, J. de.; Jahns, G.; Knight, A.C.; Patterson, D.E.; Poesse, G.J. and Vitlox, O. (eds.). The Netherlands. 79-91 pp.
- Quiroga, A.R.; Buschiazzi, D.E. and Peinemann, N. 1999. Soil compaction is related to management practices in the semi-arid Argentine pampas. *Soil & Tillage Research.* 52(1999):21-28.
- Raper, R.L.; Reeves, D.W. and Burt, E.C. 1998. Using in-row subsoiling to minimize soil compaction caused by traffic. *Journal of Cotton Science.* 2:130-135.
- Rosolem, C.A. and Takahashi, M. 1998. Soil compaction and soybean root growth. *In: Root Demographics and their Efficiencies in Sustainable Agriculture, Grasslands and Forest Ecosystems.* Box, J.E. (ed.).

- Proceedings of the 5th Symposium of the International Society of Root Research. Clemson, South Carolina, USA. 295-304 pp.
- Silva, V.R.; Reinert, D.J. and Reichert, J.M. 2000. Soil strength as affected by grazing and soil management. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*. 24:191-199.
- Singh, B.P. and Sainju, U.M. 1998. Soil physical and morphological properties and root growth. *Horticultural Science*. 33:966-971.
- Soane, B.D.; Dickson, J.W. and Campbell, D.J. 1982. Compaction by agricultural vehicles: a review. III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil & Tillage Research*. 2(1982):3-36.
- Soane, B.D. 1990. The role of organic matter in soil compactibility: a review of some practical aspects. *Soil & Tillage Research*. 16(1990):179-201.
- Soane, B.D. y Van Ouwerkerk, C. 1994. Soil Compaction in Crop Production. Soane, B.D. y Van Ouwerkerk, C. (eds.). *Developments in Agricultural Engineering Series*. Vol. 11. Elsevier Science. Amsterdam, The Netherlands. 662 pp.
- Soil Science Society of America. 2013. *Glossary of Soil Science Terms*. Madison, WI, USA. 92 p.
- Sparovek, G.; Lambais, M.R.; Silva, A.P. y Tormena, C.A. 1999. Earthworm (*Pontoscolex corethrurus*) and organic matter effects on the reclamation of an eroded Oxisol. *Pedobiología*. 43:698-704.
- Spoor, G. 1995. Application of mole drainage in the solution of subsoil management problem. *In: Subsoil Management Techniques*. *Advances in Soil Science*. Jayawardane, N.S. and Stewart, B.A. (eds.). 67-109 pp.
- Spoor, G. and Godwin, R.J. 1978. An experimental investigation into the deep loosening of soil by rigid tines. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 23:243-258.
- Taylor, H.M. 1971. Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield. *Compaction of Agricultural Soils*, American Society of Agricultural Engineering. 292-305 pp.
- Taylor, J.H. 1989. Controlled traffic research: an international report. *Agricultural Engineering*. *In: Proceedings of the 11th International Congress on Agricultural Engineering*. Dublin, Ireland. 1787-1794 pp.
- Taylor, J.H. 1992. Reduction of traffic-induced soil compaction. *Soil & Tillage Research*. 24:301-447.
- Thomas, G.W.; Haszler, G.R. and Blevins, R.I. 1996. The effect of organic matter and tillage on maximum compactibility of soils using the proctor test. *Soil Science*. 161:502-508.
- Tisdall, J.M. 1991. Fungal hyphae and structural stability of soil. *Australian Journal of Soil Research*. 29:729-743.
- Tormena, C.A.; Barbosa, M.C.; Costa, A.C.S. and Goncalves, A.C.A. 2002. Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an oxisol managed by different soil tillage systems. *Scientia Agricola*. 59:795-801.

- Tullberg, J.N. 1990. Why control field traffic. *In: Soil Compaction Workshop*. Hunter, M.N.; Paull, C.J. and Smith, G.D. (eds). Proceedings of Queensland Department of Primary Industries. Toowoomba, Australia. 28:13-25
- Voorhees, W. B.; Evans, S.D. and Warnes, D.D. 1985. Effect of preplant wheel traffic on soil compaction, water use and growth of spring wheat. *Soil Science Society of America Journal*. 49:215-220.
- Weber, R.; Hrynczuk, B.; Biskupski, A. and Wlodek, S. 2000. Variability of compaction, density and moisture of soil as depending on the tillage technique. *Inzynieria Rolnicza* 6:319-325.
- Wiermann, C.; Werner, D.; Horn, R.; Rostek, J. and Werner, B. 2000. Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatment in Germany. *Soil & Tillage Research*. 53(2000):117-128.
- Zhang, H. 1994. Organic matter incorporation affects mechanical properties of soil aggregates. *Soil & Tillage Research*. 31(1994):263-275.

7.2. Artículo publicado en Terra Latinoamericana, 32(2):119-126.

# TERRA LATINOAMERICANA

ABRIL - JUNIO DE 2014 • VOLUMEN 32 • NÚMERO 2  
APRIL - JUNE, 2014 • VOLUME 32 • NUMBER 2

- 87 Semblanza del Dr. José de Jesús Caballero Mellado.  
*Lucta López Reyes, Armando Tapia Hernández, Teresita Jiménez Salgado, David Espinosa Victoria y Moisés Carcano Montiel*
- 99 Disponibilidad de nitrógeno y desarrollo de avena forrajera (Avena sativa L.) con aplicación de biosólidos.  
Nitrogen availability and growth of forage oats (Avena sativa L.) with application biosólidos.  
*Edgar Flores Félix, Hector Moreno Casillas, Uriel Figueroa Viramontes y María del Carmen Potisek Talavera*
- 107 Estimación de la concentración foliar usando parametrización directa albedo/absortancia de hojas.  
Estimation of foliar concentration of vegetation canopy using direct albedo/absortance parametrizations of leaves.  
*Fernando Paz Pellat y Marco Aurelio Roitberg*
- 119 Assessment of soil compaction under different management regimes using double-cycle uniaxial compression test.  
Evaluación de la compactación del suelo bajo diferentes prácticas de manejo utilizando una prueba de compresión uniaxial de doble ciclo.  
*Victor Manuel Vaca García, Aurelio Domínguez López, Andrés González Huerta, Edgar Jesús Morales Rosales, Omar Franco Mora, and Francisco Gutiérrez Rodríguez*
- 127 Distribución del carbono orgánico en los diferentes tamaños de partículas del suelo: modelo simple de cinética lineal.  
Organic carbon distribution on different particle sizes of soil: simple linear kinetic model.  
*Fernando Paz Pellat, Sara Covaieda y Jorge D. Etchevers B.*

# ASSESSMENT OF SOIL COMPACTION UNDER DIFFERENT MANAGEMENT REGIMES USING DOUBLE-CYCLE UNIAXIAL COMPRESSION TEST

Evaluación de la Compactación del Suelo bajo Diferentes Prácticas de Manejo Utilizando una Prueba de Compresión Uniaxial de Doble Ciclo

Victor Manuel Vaca García<sup>1</sup>, Aurelio Domínguez López<sup>2</sup>, Andrés González Huerta<sup>2</sup>, Edgar Jesús Morales Rosales<sup>2</sup>, Omar Franco Mora<sup>2</sup>, and Francisco Gutiérrez Rodríguez<sup>2\*</sup>

## SUMMARY

The impact of wheeled farm machines trafficking on soil compaction has not been well documented in Mexico, particularly in the maize producing area of the Toluca-Atzacmulco Valley, which features a Vertisol soil type. In addition, laboratory measurements are needed that can imitate field conditions is needed to make measurements that are sensitive, reliable and appropriate for monitoring changes in compaction and other physical soil properties while reducing destructive sampling in the field. The objective of this research was to use double-cycle uniaxial compression, penetration resistance and cutting force tests to assess the response of a Vertisol in terms of hardness, cohesiveness and adhesiveness when compacted by wheel traffic in three different types of tillage systems: zero tillage (ZT), minimal tillage (MT) and conventional tillage (CT). The study was conducted in Toluca, State of Mexico, in 2011. Soil samples were collected from the tractor's wheel track, with three repetitions at two depths. All of the variables were measured using a universal testing machine. For penetration resistance and cutting force tests, standard screwdrivers were used as probes. According to the uniaxial compression test, CT was found to increase soil hardness, relative to the other systems (47% higher on average). MT reported the highest adhesiveness value ( $0.1 \text{ N s}^{-1}$ ), but no statistically significant differences in cohesiveness were found among tillage systems. In the ZT system higher penetration resistance was observed in subsoil than in topsoil. MT obtained the maximum

cutting force value (54.55 N), while there were no significant differences between other two systems. In these trials the universal testing machine was sensitive enough to detect differences in the soil physical properties of the different tillage systems.

*Index words:* vertisol, hardness, adhesiveness, cohesiveness.

## RESUMEN

El impacto del tránsito rodado de maquinaria agrícola en la compactación del suelo ha sido poco documentado en México, particularmente en la zona productora de maíz del Valle Toluca-Atzacmulco, caracterizada por un tipo de suelo Vertisol. En adición, se requieren mediciones de laboratorio que imiten las condiciones de campo, reduciendo el muestreo destructivo, y que sean sensibles, confiables y apropiadas para monitorear cambios en la compactación y otras propiedades físicas del suelo. Esta investigación se planteó utilizar pruebas de compresión uniaxial, resistencia a la penetración y fuerza de corte, para evaluar la respuesta de un Vertisol, en términos de dureza, cohesividad y adhesividad, a la compactación por tránsito rodado en sistemas de labranza cero (LC), labranza mínima (LM) y labranza tradicional (LT). El estudio se realizó en Toluca, Estado de México, en 2011. Se obtuvieron muestras de suelo en la huella del tractor con tres repeticiones a dos niveles de profundidad. Todas las variables fueron medidas empleando una máquina universal de prueba. Para los ensayos de resistencia a la penetración y fuerza de corte, se utilizaron desarmadores estándar como sondas. De acuerdo con la prueba de compresión uniaxial, en comparación con los demás sistemas la LT incrementó la dureza del suelo (47% más en promedio), la LM reportó el valor más alto de adhesividad ( $0.1 \text{ N s}^{-1}$ ), y no se encontraron diferencias estadísticas significativas en relación con la cohesividad entre sistemas. Se observó

<sup>1</sup> Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. <sup>2</sup> Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México, Campus Universitario El Cerrillo, 50200 Toluca, Estado de México, México.

\* Autor responsable (fgfca@hotmail.com)

Recibido: junio de 2013. Aceptado: marzo de 2014.  
Publicado en Terra Latinoamericana 32: 119-126.

en el subsuelo mayor resistencia a la penetración en LC que a nivel superficial. La LM obtuvo el valor máximo de fuerza de corte (54.55 N), mientras que los otros sistemas no mostraron diferencias significativas entre ellos. Los ensayos con la máquina universal de prueba fueron suficientemente sensibles para detectar diferencias en las propiedades físicas del suelo de los diferentes sistemas de labranza.

**Palabras clave:** vertisol, dureza, adhesividad, cohesividad.

## INTRODUCTION

Soil compaction is regarded as the most serious environmental problem caused by conventional agriculture (McGarry, 2001). The overuse of wheeled farm machinery reduces pore space, resulting in dense soil with poor internal drainage and reduced aeration, which leads to increased soil strength that particularly impedes root growth (Moullart, 1998; Bayhan *et al.*, 2002; Hamza and Anderson, 2005). Most of the common operations used in intensive cropping (tilling, harvesting, spreading chemicals fertilizers) are performed by heavy wheeled machines. According to Tullberg (1990), more than 30% of the ground area is trafficked by the tires of heavy machinery even in genuine zero tillage systems (one pass at sowing). Under minimum tillage (two-three passes), the percentage is likely to exceed 60%, and in conventional tillage (multiple passes), the percentage would exceed 100% during one cropping cycle (Soane *et al.*, 1982). In spite of these circumstances, the problem of soil compaction by wheeled farm machine traffic has not been well documented in Mexico, nor specifically in the Vertisol soil characteristic of the maize producing area of the Toluca-Atlaconulco Valley.

Soil compaction is the most difficult type of degradation to identify and rationalize because no evident marks may show on the soil surface. Unlike erosion and salinization, which create strong surface evidence of degradation, finding evidence of soil compaction, its extent, nature and cause, requires physical monitoring and examination (Hamza and Anderson, 2005). Most available knowledge on the effects of soil compaction induced by machinery traffic has been acquired from field experiments (Håkansson *et al.*, 1988; Voorbees, 1992). Such effects on soil properties are complex (Batey, 1990). The degree of compaction is an important

soil structure attribute, and the most frequently used parameter to characterize compaction is dry soil bulk density (Panayiotopoulos *et al.*, 1994). Soil strength is also used as a measure of soil compaction because soil strength reflects soil resistance to root penetration (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Tardieu, 1994; Hamza and Anderson, 2003).

Sampling soil to quantify compaction and other soil physical conditions is frequently destructive, and therefore, generally considered impractical. Instead, laboratory experiments have been performed to analyze the response of the soil to machinery traffic by using confined uniaxial compression tests (Dawidowski and Lerink, 1990; O'Sullivan, 1992; Sanchez-Giron *et al.*, 1998). In this type of test, confining stress is not particularly important because the compaction process is essentially governed by the normal stresses applied by the supporting elements of the agricultural equipment rather than by the confining stress of the soil in the ground (Koolen, 1987). The double-cycle uniaxial compression test, also known as texture profile analysis in food research, has been widely employed to determine mechanical properties of different materials. Using a universal testing machine, the main advantage of this test is that it offers the possibility of obtaining data from a single, quick test for several variables such as hardness, cohesiveness, adhesiveness and elasticity, among others (Gasca-Mancera and Casas-Aleuáster, 2007). Although, at the time of this writing, this method has not been reported to evaluate soil's physical properties, further testing has compared and validated its results with penetrometer measurements and conventional adhesiveness tests of similar Vertisol soil samples.

The objective of this research was to use double-cycle uniaxial compression, penetration resistance and cutting force tests using a universal testing machine to evaluate the response of a Vertisol soil in terms of hardness, cohesiveness and adhesiveness when compacted by wheel traffic in different types of tillage systems.

## MATERIALS AND METHODS

Soil samples were obtained from three tillage systems established on a 0.25 ha area of the experimental field of the School of Agricultural Sciences at the Autonomous University of the State of Mexico, in

Toluca, State of Mexico, Mexico (19° 24' 43" N, 99° 41' 40" W, 2609 m.a.s.l.) during May 2011. The soil was classified, according to the USDA Soil Taxonomy System, as a Vertisol, suborder Uderts, great group Pelluderts and subgroup Entic Pelluderts. The experimental area has been used for wheat, oats and maize rotation under conventional tillage for more than 10 years. Three different tillage systems were established on the site during 2008 to study the effects of tillage and other production techniques on maize cultivars and soil and water quality.

The study included the following tillage systems and traffic applications:

- 1) Conventional tillage (CT): multiple passes with a disc plow (model 635, two-wheel drive tractor, John Deere 5715), harrowing, sowing and fertilization combined and hoeing; 0% stover.
- 2) Minimum tillage (MT): five passes, one with a multi-plow (model M-250, using a four-wheel drive tractor, John Deere 6603), three passes of harrowing and one of sowing and fertilization combined (two-line sowing implement, Sembradora del Bajío); 30% stover.
- 3) Zero tillage (ZT): one pass comprising sowing and fertilization (two-wheel drive tractor, John Deere 5715); 100% stover.

Some specifications of the tractors used for the agricultural operations are provided in Table 1. The experimental design consisted of a randomized complete block arrangement with three replications of the tillage systems, resulting in nine plots of 12.8 × 10 m including 16 rows 0.8 m apart; plots were separated by an 8 m wide traffic maneuvering area. A single hybrid maize cultivar (*Zea mays* L., cv. Aspros ® AS-722) was sown in all experimental plots, under a twin-line arrangement

and rain-fed conditions. Seeding density was 50 kg-ha<sup>-1</sup> with inter-plant distance of 0.15 m. Fertilizing for all systems was NPK at a rate of 120-60-30 units applied at sowing.

For all systems, soil samples were obtained from the topsoil (0-150 mm) and subsoil (150-300 mm) horizons before tillage operations to evaluate bulk density (BD, g cm<sup>-3</sup>) and total organic matter content (TOM, %). The BD was determined using the method proposed by Landeros and Serrato (2001); TOM was estimated using the AS-07 test (NOM-021-SEMARNAT-2000, 2002).

The soil samples for the double-cycle uniaxial compression test (DUC) were obtained after the hoeing operation from the topsoil level (0-150 mm) using a Soil Core Sampler (50 × 150 mm, 2" × 6" model Signature Series, AMS, Inc., American Falls, Idaho, USA) in the wheel track of each system plot (inter-rows). After sampling, the soil samples were tested on an *as-is* basis using a Universal Testing Machine (Stable Micro Systems TAX-T2, Stable Micro Systems Ltd., Godalming, Surrey, United Kingdom) with a 25 kg charge cell, adapting the method originally proposed by Gasca-Mancera and Casas-Alencáster (2007) for food samples. The values for hardness (N), adhesiveness (N s<sup>-1</sup>) and cohesiveness were obtained by performing two compression cycles of 2 mm depth (1.3% of apparent relative deformation related to the original height), using a cylindrical acrylic probe 12.7 mm in diameter at a speed of 7 mm s<sup>-1</sup>.

To measure penetration resistance (Pr), soil samples were obtained from the topsoil (0-150 mm) and subsoil (150-300 mm) horizons using the Soil Core Sampler in the wheel track of each tillage system plot (inter-rows) after the hoeing operation. The device used as a test probe in the universal testing machine was a Phillips ® screwdriver 6.3 mm in diameter, 186.01 mm<sup>3</sup> contact surface and 150 mm stem length. Samples, after collection, were subjected to one 50 mm compression cycle at an assay speed of 7 mm s<sup>-1</sup>, with the results expressed in MPa. Soil samples for the cutting force test (Cf) were obtained using the Soil Core Sampler from the subsoil horizon (150-300 mm) of each tillage system plot after the hoeing operation. The probe used for the Cf test consisted of a straight-type screwdriver (model DR-5/16x6BP, Truper Herramientas, México) with a 7.9 mm diameter and a 150 mm stem length. The sample containers were cut in half at one tip (50 mm cut length, 25 mm wide) to allow measurement of the uniaxial

**Table 1. Technical specifications of the John Deere<sup>TM</sup> tractors used in the experiment.**

|  | Model 5715 | Model 6603 |
|--|------------|------------|
| Power (kW)                                   | 66.4       | 89.0       |
| Maximum motor rotations (min <sup>-1</sup> ) | 2600       | 2400       |
| Total weight (Mg)                            | 2.600      | 4.160      |
| Wheelbase (mm)                               | 2180       | 2636       |
| Track width front/rear (mm)                  | 1310/1490  | 1310/1490  |
| Dimension of front tire <sup>†</sup>         | 13.6-24    | 13.6-24    |
| Dimension of rear tire <sup>†</sup>          | 15.5-38    | 18.4-34    |
| Air pressure of front tire (kPa)             | 110        | 110        |
| Air pressure of rear tire (kPa)              | 120        | 140        |

<sup>†</sup> Dimension according to SAE nomenclature standard J751, 1997.

component only and were disposed horizontally to simulate the action of a  $\gamma$ -angle two-face wedge. The samples were subjected to one compression cycle of 25 mm at an assay speed of 1.4 mm s<sup>-1</sup>, with the results expressed in N and joules (J) for the cutting work. Soil samples of all tillage systems were evaluated for moisture (M, gravimetric %), according to the method proposed by Landeros and Serrato (2001), before laboratory mechanical tests.

The obtained data were statistically analyzed by an analysis of variance (ANOVA) using SAS software (Statistical Analysis System, USA). All of the parameters were analyzed with a minimum of three repetitions and tested for significance ( $P < 0.05$ ) between the systems. When significant differences were found, the Tukey test was used to determine the differences between means.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Soil Properties of Experimental Site

Bulk density (BD) values before tillage operations were similar in all of the tillage systems and at both depth levels (Table 2). Similar topsoil contents of the TOM were also found for all the systems. At the subsoil level, CT reported the highest TOM value of the three systems, with an average content increment of 25% relative to the other two systems (Table 2). The values obtained for BD were slightly higher than those reported by Casado and Valencia (2004) for a representative soil horizon of the experimental field and were indicative of similar soil compaction levels throughout the entire experimental area as a result of continued use of conventional tillage. Similar topsoil contents of TOM in the three tillage systems showed that since the

establishment of MT and ZT in the experimental area (two years), the use of the multi-plow in the MT system did not efficiently incorporate the corn stover of the 2009 and 2010 crop cycles at different depths. In the ZT plots, the stover remained on the surface as mulch. TOM was found to be higher in the CT subsoil than in the subsoil of the other systems due to the incorporation of organic matter from the previous crop cycle by primary tillage operation with a disc plow.

The moisture (M) at the topsoil level after hoeing was found to be higher in CT than in the other systems (62% higher on average), and CT also reported the highest value at the subsoil level (27% higher on average) (Table 2). The highest M value of CT in the topsoil and subsoil horizons could be explained by lower water infiltration speeds, and consequently higher water retention, in a relatively weak soil structure caused by the tillage activity. Further testing, measuring mean infiltration speed in the tillage systems, corroborated this assumption. This confirms the results reported by Hamza and Anderson (2002; 2003), where the water infiltrates uncompacted soils much faster than massive, structureless soils.

### Double-cycle Uniaxial Compression Test

CT was found to increase soil hardness in the DUC test (Figure 1). The values for soil hardness were lower in MT and ZT than in CT and were statistically similar between MT and ZT (Table 3). The shape of the DUC curves revealed a similar soil structure for the three systems, with lower cohesiveness values for ZT (Table 3). Although MT reported the highest adhesiveness values, none of the systems showed significant values for adhesiveness due to the lower soil moisture content (Table 3). The higher hardness values

Table 2. Soil properties for minimum tillage (MT), zero tillage (ZT) and conventional tillage (CT) plots of the experimental area<sup>1</sup>.

|                              | Tillage system | Bulk density       | Total organic matter content | Moisture <sup>2</sup> |
|------------------------------|----------------|--------------------|------------------------------|-----------------------|
|                              |                | g cm <sup>-3</sup> | %                            |                       |
| Topsoil horizon (0-150 mm)   | MT             | 1.31a              | 7.18a                        | 21.5a                 |
|                              | ZT             | 1.27a              | 7.11a                        | 20.5a                 |
|                              | CT             | 1.33a              | 7.17a                        | 35.0b                 |
| Subsoil horizon (150-300 mm) | MT             | 1.33a              | 6.57b                        | 45.6c                 |
|                              | ZT             | 1.32a              | 6.16b                        | 47.9c                 |
|                              | CT             | 1.28a              | 7.95c                        | 60.0d                 |

<sup>1</sup> Each value is the average of at least three observations; means in the same column followed by different letters are significantly different ( $P < 0.05$ ) by the Tukey test. <sup>2</sup> Sampled before mechanical testing.

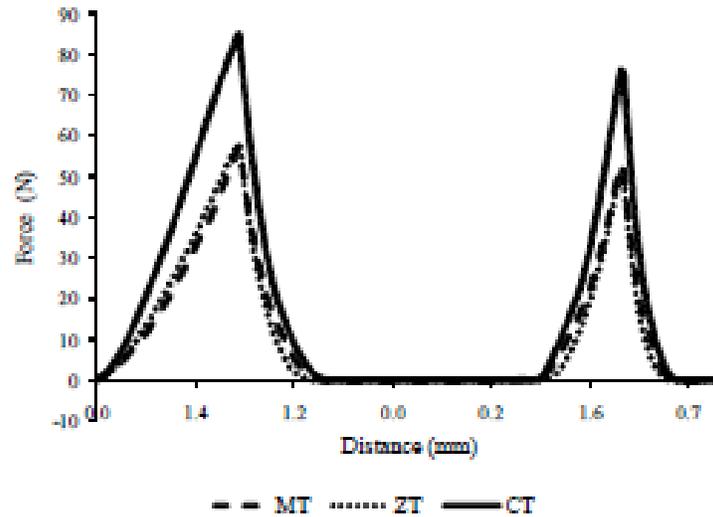


Figure 1. Double-cycle uniaxial compression curves for minimum tillage (MT), zero tillage (ZT) and conventional tillage (CT) systems at 1.5% of the apparent relative deformation.

reported for CT in comparison with the other tillage systems confirm the results of Dickson and Ritchie (1993), who compared zero and reduced ground pressure traffic systems with a conventional traffic system.

According to Gasca-Mancera and Casas-Alencáster (2007), the ARD level used may have influenced the manifestation of hardness, and this effect could explain the differences and the lack of correlation with the results of the penetration resistance (Pr) test (Table 4). Although no statistically significant differences were found among the tillage systems for cohesiveness, numerically lower values for ZT could reflect poorer topsoil aggregate stability due to lower organic residue

content and insufficient re-wetting (Radford *et al.*, 2007), which could lead to higher soil resistance to root penetration (Narro, 1994). MT reported the highest adhesiveness, but because soil moisture content was lower than 60%, none of the systems showed relevant adhesiveness values. MT's adhesiveness could be related to slightly lower water content in the test samples compared with the other systems. Ortiz-Callejate and Hernanz (1989) sustain that adhesiveness is drastically heightened with small decrements in water content.

Penetration Resistance

The subsoil maximum Pr values obtained for ZT were significantly higher than the values of the topsoil level (Table 4). For the first 50 mm of the topsoil horizon, MT was found to increase penetration resistance (Figure 3), with reported values slightly higher than those of CT (Table 4). This could be explained by the use of multi-plow equipment which produces less fragmentation of the topsoil than the disc plow. At the subsoil level, with higher moisture content than the soil surface, Pr behavior was similar for all systems (Figure 2). Higher Pr values in the subsoil compared with those in the topsoil level are not consistent with the values reported by Botta *et al.*, (2008), who showed that the pressure exerted by

Table 3. Some physical property values of Vertical topsoil (0-150 mm) of three different tillage systems under the double-cycle uniaxial compression test<sup>1</sup>.

| Tillage system | Hardness | Cohesiveness | Adhesiveness      |
|----------------|----------|--------------|-------------------|
|                | N        |              | N s <sup>-1</sup> |
| MT             | 57.26a   | 0.42a        | 0.10a             |
| ZT             | 57.92a   | 0.35a        | 0.01b             |
| CT             | 84.85b   | 0.42a        | 0.01b             |

<sup>1</sup> Each value is the average of nine observations; means within the same column followed by different letters are significantly different (*P* < 0.05, Tukey). MT = minimum tillage; ZT = zero tillage; CT = conventional tillage.

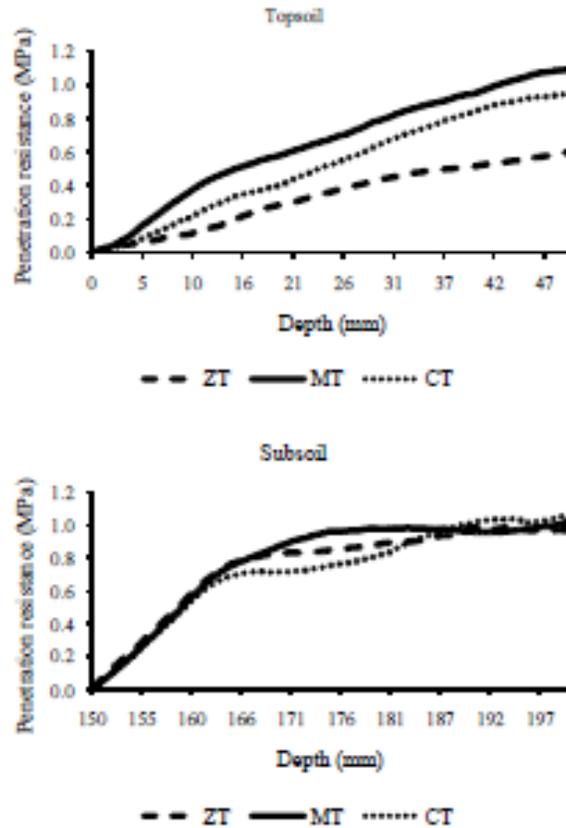


Figure 2. Penetration resistance test curves for zero tillage (ZT), minimum tillage (MT) and conventional tillage (CT) systems at topsoil and subsoil levels.

tractor passes results in a greater increase of topsoil cone index values (as a measure of soil strength) compared to the subsoil levels.

#### Cutting Force

Figure 3 shows the cutting force (Cf) curves of 25 mm of displacement in a horizontal plane of the subsoil horizon (150-300 mm) for the different tillage systems. For the MT system, the Cf average numerical value obtained at the end of the test is higher than the probe's initial impulsion force curve, which is a revealing aspect of the system's wedge effect at increasing distance, and was significantly higher (by 16% on average) than the

two other systems ( $P < 0.05$ ). The maximum values for ZT were not significantly different from those for the CT system for the distance range (25 mm) of the evaluated subsoil horizon (Table 4). The form of the obtained Cf curves agrees with the results obtained by Vincent (1991) in the way that the shapes typically reflect the forms associated with the wedge fracture assay, showing an initial peak at the impulsion of the cutting instrument, followed by a merely constant force in the rupture propagation ahead of the wedge. The higher maximum value obtained at the end of this test for MT could also be explained by the multi-plow, which produces greater subsoil fragmentation than the disc plow, thus producing higher compaction levels at this

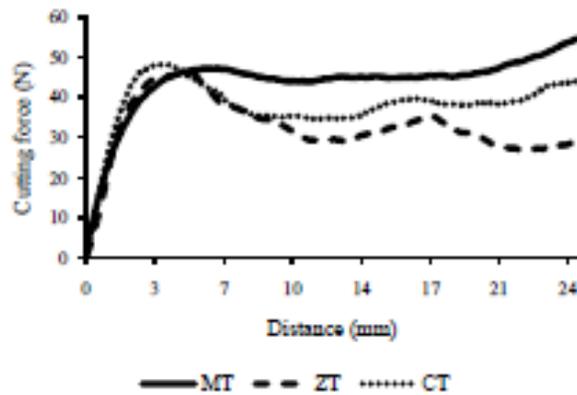


Figure 3. Cutting force test as affected by minimum tillage (MT), zero tillage (ZT) and conventional tillage (CT) system at subsoil level measured on a horizontal plane.

Table 4. Maximum values of some soil physical properties of the different tillage systems' plots<sup>1</sup>.

| Tillage system | Penetration resistance |                      | Cutting force <sup>2</sup> | Cutting work |
|----------------|------------------------|----------------------|----------------------------|--------------|
|                | Topsoil (0-50 mm)      | Subsoil (150-200 mm) |                            |              |
|                | MPa                    |                      | N                          | J            |
| MT             | 1.10a                  | 1.02a                | 54.55b                     | 0.14b        |
| ZT             | 0.60b                  | 0.99a                | 46.10a                     | 0.12a        |
| CT             | 0.95a                  | 1.06a                | 48.14a                     | 0.12a        |

<sup>1</sup> Each value is the average of nine observations; the means within the columns followed by different letters are significantly different ( $P < 0.05$ , Tukey); MT = minimum tillage; ZT = zero tillage; CT = conventional tillage. <sup>2</sup> Means of maximum cutting force values at subsoil level (150 mm) for each treatment.

level with subsequent wheel traffic passes compared with other tillage systems.

### CONCLUSIONS

The following conclusions can be made based on the results obtained with the experimental conditions proposed in this study:

- The double-cycle uniaxial compression tests proved sensitive enough to detect differences in hardness, cohesiveness (numerical), and adhesiveness of soil samples of the different tillage systems.
- The pressure exerted by the amount of wheeled traffic passes did not cause a linear increase in soil compaction at the topsoil level in a Vertisol, according to the Pr tests accomplished in the universal testing machine.

- Subsequent wheel passes on fragmented subsoil after multi-plow use at minimal tillage slightly increased subsoil compaction, according to the Cf and Pr tests.
- The benefits of multi-plow use in reducing soil compaction during this period (two years) could not be detected by any of the assay methods used in this experiment.

### ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by grant 2959/2010SF from the State of Mexico Autonomous University (UAEM) and by a grant from the Science and Technology National Council (CONACyT), Mexico.

## LITERATURE CITED

- Batey, T. 1990. Control of compaction on the farm. A personal view. *Soil Technol.* 3: 225-229.
- Bayhan, Y., B. Kayinoglu, and E. Gönülol. 2002. Effect of soil compaction on sunflower growth. *Soil Tillage Res.* 68: 31-38.
- Botta, G. F., D. Rivero, M. Toum, F. Belloni-Melcon, O. Pozzolo, G. Nardon, R. Balluerna, A. Tolon-Becerra, H. Rosatto, and S. Stadler. 2008. Soil compaction produced by tractor with radial and cross-ply tyres in two tillage regimes. *Soil Tillage Res.* 101: 44-51.
- Dawidowski, J. B. and P. Lerink. 1990. Laboratory simulation of the effects of traffic during seedbed preparation on soil physical properties using a quick uni-axial compression test. *Soil Tillage Res.* 17: 31-45.
- Dickson, J. W. and R. M. Ritchie. 1993. Soil and crop responses to zero, reduced ground pressure and conventional traffic systems in an arable rotation on a clay Loam. Departmental Note-Scottish Centre of Agricultural Engineering. UK.
- Gasca-Manzana, J. C. and N. B. Casas-Alencaster. 2007. Addition of nixtamalized corn flour to fresh nixtamalized corn masa. Effect on the textural properties of masa and tortilla. *Rev. Mex. Ing. Quím.* 3: 317-328.
- Håkansson, I., W. B. Voorhees, and H. Riley. 1988. Vehicle and wheel factors influencing compaction and crop response in different traffic regimes. *Soil Tillage Res.* 11: 239-282.
- Hamza, M. A. and W. K. Anderson. 2002. Improving soil fertility and crop yield on a clay soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 53: 615-620.
- Hamza, M. A. and W. K. Anderson. 2003. Responses of soil properties and grain yields to deep ripping and gypsum application in a compacted loamy sand soil contrasted with a sandy clay loam soil in Western Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 54: 273-282.
- Hamza, M. A. and W. K. Anderson. 2005. Soil compaction in cropping systems. A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82: 121-145.
- Koolen, A. J. 1987. Deformation and compaction of elemental soil volumes and effects on mechanical soil properties. *Soil Tillage Res.* 10: 5-19.
- Landeros, F. V. y C. R. Serrato. 2001. Instructivo para análisis de suelos. Propiedades físicas. Laboratorio de suelos CIEAF. UAEMés. Toluca, México.
- McGarry, D. 2001. Tillage and soil compaction. pp. 209-214. In: L. García-Torres, J. Benites, and A. Martínez-Vilela (eds.). *First World Congress on Conservation Agriculture*. Natural Resource Sciences. Madrid, Spain.
- Moulaet, J. 1998. Factors influencing soil and subsoil compaction and impact of compaction on yield of different plants. pp. 145-154. In: *Proceedings of the First Workshop of the Concerted Action on Subsoil Compaction*. DLO-Staring Centre, Wageningen, The Netherlands.
- Narro, E. 1994. *Física de suelos con enfoque agrícola*. Trillas. México, D.F.
- NOM-021-SEMARNAT-2000 (Norma Oficial Mexicana). 2002. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos, estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial (Segunda Sección)*. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D. F.
- O'Sullivan, M. F. 1992. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivation. *Soil Tillage Res.* 24: 257-269.
- Panayiotopoulos, K. P., C. P. Papadopoulos, and A. Hatjioannidou. 1994. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil Tillage Res.* 31: 323-337.
- Radford, B.J., D.F. Yule, D. McGarry, and C. Playford. 2007. Amelioration of soil compaction can take 5 years on a Vertisol under no till in the semi-arid subtropics. *Soil Tillage Res.* 97: 247-255.
- Sánchez-Girón, V., E. Andreu, and J. L. Hensenz. 1998. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. *Soil Tillage Res.* 48: 37-50.
- Soane, B. D., J. W. Dickson, and D. J. Campbell. 1982. Compaction by agricultural vehicles: A review III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil Tillage Res.* 2: 3-36.
- SAE International (Society of Automotive Engineers). 1997. Off-road tire and rim classification-construction machines. Standard J751\_199704. Ann Arbor, MI, USA.
- Tardieu, F. 1994. Growth and functioning of roots and of root systems subjected to soil compaction towards a system with multiple signaling. *Soil Tillage Res.* 30: 217-243.
- Tullberg, J. N. 1990. Why control field traffic. pp. 13-25. In: G. D. Smith, C. J. Paull, and M. N. Hunter (eds.). *Proceedings: Soil Compaction Workshop*. QDPI Conference Centre Toowoomba, Australia.
- Vincent, J. F. V. 1991. Automating the microtome. *Microsc. Anal.* 23: 19-21.
- Voorhees, W. B. 1992. Wheel-induced soil physical limitations to root growth. pp. 73-95. In: J. L. Hatfield and B. A. Stewart (eds.). *Limitations to plant root growth*. *Advances in Soil Science*. Springer. New York, NY, USA.

### 7.3. Artículo publicado en Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, 8(5):1495-1507.

| CONTENIDO • CONTENTS   |   | Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas |   | ISSN: 2007-0934                      |
|--|---|--|---|--------------------------------------|
| ARTÍCULOS • ARTICLES   |   | Página                                 |   |                                      |
| Cohesión social de la productora de flores selectas de Tequexquahuac, Texcoco, México. • Social cohesion of the producer of selected flowers in Tequexquahuac, Texcoco, Mexico.  | Leidy del Carmen Flores Flores, Mercedes A. Juárez Velázquez, Jorge Carlos Juárez y Juan Felipe Nieto Epifanio.   | 1337-1350                              |  | Edición Bilingüe • Bilingual Edition |
| Estudio de la tecnología de producción de trigo por agrosistema, para señalar necesidades de información.  | • Study on the production of wheat technology per agro-system, for pointing out needs of information.   | 1351-1363                              |   |                                      |
| Análisis de rentabilidad y distribución de la uva de mesa de Hermosillo Sonora en Estados Unidos y la Unión Europea. • Profitability and distribution analysis of table grapes of Hermosillo, Sonora in the United States and the European Union.  | Alain de Jesús Torres Álvarez, José Miguel Chuata Siverio, Luis Eduardo Chahín Tovar, Ramón Valdovinos Alada y Juan Mercedes Jimenez.                                   | 1365-1376                              |   |                                      |
| El riego en nopal influye en el almacenamiento y acondicionamiento de la tana. • Irrigation in nopal influences the storage and packaging of tana.   | Yumbelito Nieto-García, Ana Karen Calderón-Valdazo, Jorge A. Zepeda, Alonso Sierra-Pérez y Jaime Montes-González.   | 1377-1390                              |   |                                      |
| Estimación no-paramétrica del producto interno bruto de los municipios de México. • Non-parametric estimation of gross domestic product in the municipalities of Mexico.   | Adrián González-Ferrado.  | 1391-1404                              |   |                                      |
| El producto interno bruto de los municipios de México: II. Estados M-Z. • The gross domestic product of municipalities of Mexico: II. States M-Z.  | Adrián González-Ferrado y Gilberto Chalgos-Cedillo.   | 1405-1421                              |   |                                      |
| Varianza entre y dentro e índice de repetibilidad de características cuantitativas de fruto de guayaba. • Variance between and within the index of repeatability of quantitative characteristics of guava fruit.                                   | José Saúl Padilla Ramírez, Ernesto González Guana, Víctor Manuel Rodríguez Moreno, Luis Reyes Muro, Eusebio Sabidoz Orosco Cruz y Elvira Acosta Díaz.                   | 1423-1432                              |   |                                      |
| Efecto del extracto de ruda ( <i>Ruta graveolens</i> ) en el crecimiento micelial de <i>Trichoderma</i> . • Effect of the extract of rue ( <i>Ruta graveolens</i> ) on the mycelial growth of <i>Trichoderma</i> .                                 | Claudia Kain Reyes-Solis, Daniel Martínez-Carmona, Rutilio Morales Alonso, Mercedes Sobal Cruz, Alan Hualde Escudero-Lisbe y José Guillermo Avila-Arenedo.              | 1433-1446                              |   |                                      |
| Crecimiento de tres hongos comestibles tropicales en medios de cultivo y residuos agrícolas. • Growth of three tropical edible fungi in culture mediums and agricultural waste.  | Sonia Delgado Carretero-Ruiz, Silvia Cappello-García, Rigoberto Gutiérrez-Hernández, Joaquín Cifuentes-Blanco y Edmundo Rodríguez-Gil.                                  | 1447-1458                              |   |                                      |
| Sistema de producción y parámetros de calidad agronomica de brécoli en Mixquic, D. F. • Production system and parameters of agronomic quality of broccoli in Mixquic, D. F.  | Mé. Antonia Pérez-Olivera, Rosalva García-Mateos, Mario Pérez González y Heriberto Navarro-Guzmán.  | 1459-1468                              |   |                                      |
| Variedades de maíz azul. Características seleccionadas por múltiples caracteres y estabilidad del rendimiento. • Varieties of maize azul. Characteristics selected for multiple characters and stability of the yield.                             | José Luis Acuñaño Vasquez, Israel Rojas Martínez y Gerardo Fernando Quiñero Hernández.  | 1469-1480                              |   |                                      |
| Cuantificación microanalítica del consumo de agua en la mabobuama ( <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd.). • Microanalytical quantification of water consumption in poinsettia ( <i>Euphorbia pulcherrima</i> Willd.).                              | Felipe Pacheco-Hernández, Manuel de Jesús Sosa-Amparo, Ivan Alvar Tejada, Ramón Arteaga-Ramírez, Oscar Gabriel Villalón-Torres y Helena Emma Karim-Usland-Weiss.        | 1481-1493                              |   |                                      |
| Compactación de un verticil bajo tres sistemas de labranza en maíz ( <i>Zea mays</i> L.). • Compaction of a verticil under three tillage systems in maize ( <i>Zea mays</i> L.).   | Vicente Manuel Vaca García, Juan José Martínez Villanueva, Andrés González Huera, Edgar Jesús Morales Rosales, Benjamín Zamudio-González y Francisco Quiñero Rodríguez. | 1495-1507                              |   |                                      |
| Catálogo de especies frutales presentes en el sureste del Estado de México, México. • Catalogue of fruit species in the southeast of the State of Mexico, Mexico.  | Miguel Roby Arrasca, Isabel Marmoreca, Lo Cruz, Andrés González Huera, Delina de Jesús Pérez López, Juan Guillermo Cruz Castillo y Nisemi Ciudadanoma Martínez.         | 1509-1517                              |   |                                      |
| Conservación <i>in situ</i> , manejo y aprovechamiento de maíz Palomero Toluqueño con productores custodios. • <i>In situ</i> conservation, management and utilization of Toluqueño popcorn with custodian producers.                              | Alfredo José Gómez Vázquez, Micaela de la O Ojeda, Amalia Santacruz Virelli e Higinio López Sánchez.  | 1519-1530                              |   |                                      |
| ENSAJO • ESSAY   |   |  |   |                                      |
| Análisis de la estrategia MásAgro-maíz. • MásAgro-maize strategy analysis.   | Antonio Terrero Ferrández, Alejandro Espinosa Calderón, José Isabel Corón Flores y Hugo Mojá Andrade.   | 1531-1547                              |   |                                      |
| NOTAS DE INVESTIGACIÓN • INVESTIGATION NOTES   |   |  |   |                                      |
| Sobrevivencia de <i>Azospirillum brasilense</i> después de aplicar herbicidas en <i>Triticum aestivum</i> L. Var. Altipiano. • Survival of <i>Azospirillum brasilense</i> after applying herbicides on <i>Triticum aestivum</i> L. Var. Altipiano. | Juan Francisco Aguirre-Cadenas, Silvia Reyes Teller, Mariana Casarley y Juan Francisco Aguirre-Molina.  | 1549-1555                              |   |                                      |
| Evaluación de tecnología para maximizar la producción de chile serrano en la Región Lagunera. • Evaluation of technology to maximize the production of chile serrano in the Region Lagunera.   | Clayton Diego Rodríguez, Marco Antonio Inzunza Inzunza, M. Magdalena Villa, Cinturera, Ernesto Alonso Canales Valencia y Abel Ramón López.                              | 1557-1565                              |   |                                      |

Rev. Mex. Cienc. Agríc. Vol. 5 Núm. 8 p. 1337-1565 12 de noviembre - 31 de diciembre, 2014



Rev. Mex. Cienc. Agríc. Vol. 5 Núm. 8 p. 1337-1565 12 de noviembre - 31 de diciembre, 2014

## Compactación de un vertisol bajo tres sistemas de labranza en maíz (*Zea mays* L.)<sup>2</sup>

### Compaction of a vertisol under three tillage systems in maize (*Zea mays* L.)

Victor Manuel Vaca García<sup>1</sup>, Juan José Martínez Villanueva<sup>1</sup>, Andrés González Huerta<sup>2</sup>, Edgar Jesús Morales Rosales<sup>3</sup>, Benjamín Zamudio González<sup>4</sup> y Francisco Gutiérrez Rodríguez<sup>5</sup>

<sup>1</sup>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; jjmv\_2206@hotmail.com). <sup>2</sup>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. (agonzalezrh@uaemex.mx; ejmorales@uaemex.mx). <sup>3</sup>Sitio Experimental Metepec-INIAE, km 4.5, carretera Toluca-Zitacuaro, Vialidad Adolfo López Mateos, Colonia San José Barbabosa, Municipio de Zitacuaro, Estado de México. C. P. 51350. Tel. (722) 278 4331. (zamuio.benjamin@inifap.gob.mx). <sup>4</sup>Autor para correspondencia: fgrfca@hotmail.com.

#### Resumen

El comportamiento a corto plazo de las propiedades físicas de un vertisol, bajo sistemas de labranza tradicional y de conservación, en la zona de producción de maíz (*Zea mays* L.) del Valle Toluca-Atzacmulco, aún no ha sido reportado. La presente investigación se desarrolló durante un periodo de tres años (2010 - 2012) en Toluca, Estado de México, para evaluar el efecto de los sistemas de labranza tradicional (LT), mínima (LM) y cero (LC), sobre la compactación de un vertisol y el rendimiento del maíz. Para determinar la compactación del suelo, se midieron las variables de densidad aparente (Da), resistencia a la penetración, mediante el índice de cono (IC), y velocidad media de infiltración del agua (VMI), en cada ciclo de cultivo. En general, para todos los ciclos y sistemas, la Da se incrementó con la profundidad y el mayor valor se presentó en la capa más profunda. El valor más alto de Da (1.64 g cm<sup>-3</sup>) se observó en LC a 15-30 cm de profundidad. Para el IC, el valor más alto (3 998 kPa), así como el mayor valor promedio (3 401 kPa), también fueron observados en LC. Para todos los ciclos de cultivo, la mayor VMI promedio se registró en LT (0.088 mL cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>). Los mayores valores de rendimiento, en todos los ciclos agrícolas, fueron obtenidos en LM. El análisis de las

#### Abstract

The short-term behaviour of the physical traits of a vertisol under traditional systems and conservation tillage in the production area of maize (*Zea mays* L.) Valley Toluca-Atzacmulco, has not been reported so far. This research was developed over a three year period (2010 - 2012) in Toluca, State of Mexico, to evaluate the effect of conventional tillage systems (LT), minimum (LM) and zero (LC) on the compaction of a vertisol and yield of maize. In order to determine soil compaction, we measured the variables of bulk density (Da), resistance to penetration by the cone index (CI), and mean velocity of water infiltration (AIR) in each crop cycle. In general, for all cycles and systems, Da increased with depth and showed the highest value in the deepest layer. The highest value of Da (1.64 g cm<sup>-3</sup>) was observed in LC at 15-30 cm depth. For the CI, the highest value (3 998 kPa) and the highest average value (3 401 kPa), were also observed in LC. For all crop cycles, the highest mean AIR was recorded in LT (0.088 mL cm<sup>-2</sup> min<sup>-1</sup>). The highest yield values in all agricultural cycles were obtained in LM. The analysis of the different variables could not establish, in the short term, clear trends in the increase or remediation of compaction parameters of vertisol under different tillage systems.

\* Recibido: febrero de 2014  
Aceptado: julio de 2014

distintas variables no permitió determinar, en el corto plazo, tendencias claras en el incremento o remediación de los parámetros de compactación del vertisol bajo los diversos sistemas de labranza.

**Palabras clave:** *Zea mays* L., densidad aparente, índice de cono, rendimiento, velocidad de infiltración.

## Introducción

En un contexto agronómico, la compactación es el resultado de la aplicación al suelo de cualquier fuerza, por ejemplo, la ejercida por la labranza y el tránsito rodado de maquinaria agrícola, que incrementa la densidad aparente del suelo y, por consiguiente, disminuye la porosidad del mismo (Soil Science Society of America, 2013). La compactación del suelo se asocia frecuentemente con una reducción en el rendimiento del cultivo, porque restringe el movimiento de agua, aire y raíces (Tardieu, 1994; Filipovic et al., 2006).

Se afirma que en cualquier superficie donde opere tránsito rodado de maquinaria agrícola, se requiere del empleo de la labranza para regresar al suelo a una baja impedancia para la exploración de raíces y a un estado conductivo para la infiltración del agua (Carter et al., 1999). En este sentido, el sistema de labranza convencional (tradicional) involucra, usualmente, la utilización del arado de vertedera y labranza secundaria adicional para preparar la cama de siembra. Este sistema está basado en una alta intensidad de trabajo del suelo y en el volteo del mismo (Filipovic et al., 2006). Durante el ciclo de labranza convencional pueden aparecer dos problemas diferentes de compactación del suelo. El primero es la compactación del horizonte de cultivo o compactación superficial, que puede ser resuelto por la labranza anual.

El segundo es la compactación de la capa bajo el horizonte de labranza anual o compactación del subsuelo (piso de arado), donde el problema se magnifica debido a que la compactación presenta un efecto acumulativo que es más complejo y costoso de resolver que el de la compactación en el horizonte de cultivo (Filipovic et al., 2006). En contraparte, los sistemas de labranza de conservación son comúnmente el resultado de prácticas reducidas de labranza. Estos sistemas tratan de alterar al suelo lo menos posible para conservar su estructura natural, lo que debería conducir a una menor compactación (Varva et al., 1997; Weise y Bourarach, 1999).

**Keywords:** *Zea mays* L., bulk density, cone index, infiltration rate, yield.

## Introduction

In an agricultural context, compaction is the result of land application of any force, for instance, exerted by tillage and agricultural machinery of wheeled traffic, which increases soil bulk density and, consequently, decreases the porosity (Soil Science Society of America, 2013). Soil compaction is often associated with a reduction in crop yield, because it restricts the movement of water, air and roots (Tardieu, 1994; Filipovic et al., 2006).

It is alleged that on any surface where road traffic operate farm machinery, requires the use of tillage to return to a low impedance ground for exploration of roots and a conductive state for water infiltration (Carter et al., 1999). In this sense, the conventional tillage system (traditional) involves usually the moldboard plow and additional secondary tillage to prepare the seedbed. This system is based on high labour intensity of the soil (Filipovic et al., 2006). During the cycle of two different tillage soil compaction problems can occur. The first is the growing horizon compaction or surface compaction, which can be solved by annual tillage.

The second is compaction of the layer below the horizon of annual tillage or compaction of the subsoil (plow pan), where the problem is magnified because compaction has a cumulative effect that is more complex and costly to solve than the compaction on the horizon of the crop (Filipovic et al., 2006). In contrast, the conservation tillage systems are commonly the result of reduced tillage practices. These systems try to alter the soil as little as possible to conserve its natural structure, which should lead to less compaction (Varva et al., 1997; Weise and Bourarach, 1999).

Hamza and Anderson (2005) considered certain physical traits of the soil as the main parameters used to characterize compaction. These correspond to the bulk density, soil strength or penetration resistance and infiltration of water into the soil. Spatial and temporal analysis of the dynamics of the physical traits of the soil is used as an indicator of its quality and, magnitude of the degradation processes of their structure and compactness. This method increases the accuracy of the predictions about the response of these

Hamza y Anderson (2005), consideran ciertas propiedades físicas del suelo como los principales parámetros usados para caracterizar la compactación. Estas corresponden a la densidad aparente, la dureza del suelo o resistencia a la penetración y la infiltración de agua en el suelo. El análisis espacial y temporal de la dinámica de las propiedades físicas del suelo, se utiliza como indicador de la calidad del mismo y de la magnitud de los procesos de degradación de su estructura y de compactación. Dicho método incrementa la certeza de los pronósticos acerca de la respuesta de esas propiedades a diversos usos, bajo determinadas prácticas de manejo (Muñoz-Villalobos *et al.*, 2011). Aunque el contenido de humedad es considerado, usualmente, como el factor más importante que influencia los procesos de compactación del suelo (Soane y Van Ouwerkerk, 1995; Hamza y Anderson, 2005), el grado de compactación originado por la labranza y el tránsito de maquinaria pesada es también, con frecuencia, una función de su textura (de las proporciones de partículas de arena, arcilla y limo), densidad inicial, estructura, contenido de materia orgánica, y de las condiciones climáticas (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Raper *et al.*, 1998; Mosaddeghi *et al.*, 2000). Correlación a la textura del suelo, Pillai y McGarry (1999), afirman que los vertisoles, que combinan un alto contenido de arcilla con una gran proporción de arcillas expandibles, presentan propiedades inherentes que facilitan la reparación de una estructura de suelo compactada, por lo que se esperaría que este tipo de suelos experimentara un rápido mejoramiento a corto plazo (Radford *et al.*, 2007).

Diversas investigaciones han determinado la duración de los efectos adversos de la aplicación de tránsito rodado y prácticas de labranza en vertisoles (Alakukku, 1996; Radford *et al.*, 2007), así como su influencia en la pérdida de rendimiento de diversos cultivos, entre ellos el maíz (*Zea mays* L.), (Hansson y Reeder, 1994; Filipovic *et al.*, 2006); no obstante, el comportamiento de las propiedades físicas de un vertisol a corto plazo, específicamente en la principal zona de producción de maíz del Estado de México, correspondiente al Valle Toluca-Atzacmulco, bajo sistemas de labranza tradicional y de conservación, aún no ha sido estudiado, por lo que la presente investigación planteo como objetivos, determinar la influencia de tres sistemas de labranza (tradicional, mínima y cero) sobre la compactación de un vertisol, así como su efecto en el rendimiento de maíz, durante tres ciclos agrícolas anuales consecutivos.

traits to various uses, under certain management practices (Muñoz-Villalobos *et al.*, 2011). Although, the moisture content is considered usually as the most important factor influencing the processes of soil compaction (Soane and Van Ouwerkerk, 1995; Hamza and Anderson, 2005), the degree of compaction caused by tillage and traffic of heavy machinery is often a function of their texture (the proportions of particles of sand, clay and silt), initial density, structure, organic matter content, and climatic conditions (Panayiotopoulos *et al.*, 1994; Raper *et al.*, 1998; Mosaddeghi *et al.*, 2000). With regard to soil texture, Pillai and McGarry (1999) stated that vertisols, which combine a high clay content with a high proportion of swelling clays, have inherent traits that facilitate the repair of a compacted soil structure that would be expected that by this type of soils would experience a rapid improvement in the short term (Radford *et al.*, 2007).

Research has determined the length of the side effects of the application of road traffic and tillage practices in vertisols (Alakukku *et al.*, 1996; Radford *et al.*, 2007) and its influence on yield loss of various crops, including maize (*Zea mays* L.), (Hansson and Reeder, 1994; Filipovic *et al.*, 2006); however, the behaviour of the physical traits of a vertisol in the short term, specifically in the main maize production area of the State of Mexico, Valley of Toluca-Atzacmulco under traditional systems and conservation tillage, has not yet been studied, so this research proposed as objectives, to determine the influence of three tillage systems (traditional, low and zero) on the compaction of a vertisol and its effect on maize yield for three consecutive annual agricultural cycles.

## Materials and methods

### Description of the experimental site

The study was conducted during the spring-summer growing seasons (PV) of 2010-2012, in an area of 0.25 ha in the experimental field of the Faculty of Agricultural Sciences at the Autonomous University of the State of Mexico (UAEM) in Toluca, State of Mexico, Mexico (North latitude 9° 24' 43", 99° 41' 40" W, 2 609 m). The climate is classified as temperate sub-humid with summer rainfall, with annual precipitation range from 800 to 1 500 mm and temperature of 4-14 °C (INEGI, 2009). Tillage systems were established

## Materiales y métodos

### Descripción del sitio experimental

El estudio fue realizado durante los ciclos agrícolas primavera-verano (P-V) del periodo 2010-2012, en un área de 0.25 ha del campo experimental de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), en Toluca, Estado de México, México (latitud norte 9° 24' 43", 99° 41' 40" longitud 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). Los sistemas de labranza se establecieron en un suelo clasificado como 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.

### Diseño experimental

El diseño experimental consistió en un arreglo de bloques completos al azar con tres repeticiones de los sistemas de labranza tradicional (LT), mínima (LM) y cero (LC), resultando en nueve parcelas de 12.8 × 10 m con 16 surcos a 0.8 m de distancia entre-surcos; cada parcela fue separada de otra por una calle de 8 m de ancho, considerada como área de maniobras de tránsito. Los sistemas de labranza fueron aplicados a las mismas parcelas cada año. Las operaciones y características de los aparos utilizados en cada sistema, se detallan en el Cuadro 1. Para los sistemas de LT y LC, se empleó un tractor con fórmula 4 × 2, potencia en el motor de 66.4 kW y 2 600 Mg de peso total y; para LM, se empleó un tractor con fórmula 4 × 4, con 89 kW de potencia en el motor y 4.16 Mg de peso total. El área experimental fue utilizada antes del 2010, para el cultivo de maíz, avena y trigo bajo LT por más de 10 años. Los sistemas de labranza fueron establecidos desde 2008 (con 0% de rastrojo para LT, 25% para LM y 100% para LC en cada ciclo agrícola), a fin de estudiar los efectos de la labranza y otras técnicas de producción en el cultivo de maíz, así como en la calidad del agua y suelo.

### Propiedades químicas del suelo

Previo al inicio de las operaciones de labranza en 2011, se obtuvieron muestras de suelo del área de estudio, para determinar las condiciones de pH, capacidad de intercambio catiónico (CIC,  $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ ), conductividad eléctrica (CE,

on a soil classified as vertisol, suborder Uderts, great group Pelluderts and, subgroup Entic Pelluderts (according to the USDA Soil Taxonomy System), belonging to the clay loam textural class.

### Experimental design

The experimental design consisted of an array of randomized complete block with three replications of traditional tillage systems (LT), minimum (LM) and zero (LC), resulting in nine parcels of 12.8 × 10 m with 16 rows 0.8 m between-grooves; each plot was separated from another by a road 8 meters wide, considered the maneuvering area of traffic. Tillage systems were applied to plots each year. Operations and features of the tools used in each system are listed in the Table 1 for the LT and LC systems, tractor formula 4 × 2, engine power of 66.4 kW and 2 600 mg total weight was used and; for LM, a tractor with formula 4 × 4, with 89 kW of engine power and 4.16 Mg total weight was used. The experimental area was used before 2010 for the cultivation of maize, oats and wheat under LT for over 10 years. Tillage systems were established since 2008 (with 0% stubble for LT, 25% for LM and 100% for LC in each agricultural cycle) in order to study the effects of tillage and other production techniques in growing maize, as well as water quality and soil.

### Soil chemical traits

Before starting tillage operations in 2011, soil samples from the study area were obtained in order to determine the conditions of pH, cation exchange capacity (CEC,  $\text{cmol}^+ \text{kg}^{-1}$ ), electrical conductivity (EC,  $\text{dS m}^{-1}$ ), total nitrogen (N%) and organic matter content (MO, %). All samples and variables were obtained and determined under the methods proposed by the NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002).

### Bulk density

Bulk density ( $D_b$ ,  $\text{g cm}^{-3}$ ) was determined under the proposed NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), by obtaining three soil samples from each plot, 15 and 30 cm depth method prior to the start of each tillage operations of each agricultural cycle.

### Resistance to penetration

In order to evaluate soil strength, resistance to penetration, obtained by using a portable penetrometer (Field Scout SC 900 Soil Compaction Meter, Spectrum® Technologies, Inc,

dS m<sup>-1</sup>), nitrógeno total (N, %) y contenido de materia orgánica (MO, %). Todas las muestras y variables fueron obtenidas y determinadas bajo los métodos propuestos por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002).

Aurora IL, USA) we used as an alternative measure in order to determine the Cone index (CI), recording the pressure in kPa applied every 2.5 cm, at a depth of 30 cm. At least three penetrometer readings were taken on the tracks of the

Cuadro 1. Sistemas de labranza y especificaciones de los aperos utilizados.

Table 1. Tillage systems and specifications of the implements used.

| Sistemas de labranza e implementos | (tipo/modelo)  | Peso (kg) | Ancho de trabajo (cm) | Profundidad de trabajo (cm) | Núm. de pases |
|------------------------------------|--|-----------|-----------------------|-----------------------------|---------------|
| <b>Labranza tradicional (LT)</b>   |  |           |                       |                             |               |
| Arado                              | (de discos/John Deere® 635)  | 599       | 76.2                  | 30                          | 2             |
| Rastra                             | (de discos tipo excéntrico/John Deere® MX425)                                | 1667      | 297                   | 10                          | 4             |
| Siembra y fertilización            | (sembradora especial para siembra directa/ sembradoras del Bajío® LC-2001 M) | 550       | 200                   | 10                          | 1             |
| Escarda                            | (cultivador de cuatro surcos/John Deere® 812)                                | 450       | 244                   | 15                          | 1             |
| <b>Labranza mínima (LM)</b>        |  |           |                       |                             |               |
| Subsoleo                           | (multirado/M-250)  | 890       | 200                   | 68.5                        | 1             |
| Rastra                             | (de discos tipo excéntrico/John Deere® MX425)                                | 1667      | 297                   | 10                          | 3             |
| Siembra y fertilización            | (sembradora especial para siembra directa/ sembradoras del Bajío® LC-2001 M) | 550       | 200                   | 10                          | 1             |
| <b>Labranza cero (LC)</b>          |  |           |                       |                             |               |
| Siembra y fertilización            | (sembradora especial para siembra directa/ sembradoras del Bajío® LC-2001 M) | 550       | 200                   | 10                          | 1             |

#### Densidad aparente

La densidad aparente ( $D_a$ , g cm<sup>-3</sup>) se determinó bajo el método propuesto por la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), mediante la obtención de tres muestras de suelo de cada parcela, a 15 y 30 cm de profundidad, previo al inicio de operaciones de labranza de cada ciclo agrícola.

#### Resistencia a la penetración

Para evaluar la dureza del suelo, se utilizó como medida alterna la resistencia a la penetración, obtenida mediante el empleo de un penetrometro portátil (Field Scout SC 900 Soil Compaction Meter, Spectrum® Technologies, Inc; Aurora IL, USA), para determinar el índice de cono (IC), registrando la presión aplicada en kPa, cada 2.5 cm, hasta una profundidad de 30 cm. Se tomaron un mínimo de tres lecturas del penetrometro en la huella del tractor de cada parcela, inmediatamente después de la operación de escarda del sistema de LT en cada ciclo agrícola. La determinación del IC, fue acompañada de la lectura de la humedad del suelo ( $H_v$ , % volumétrica), obtenida con un medidor de humedad portátil (Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum® Technologies, Inc; Aurora IL, USA), a 12 y 20 cm de profundidad.

tractor for each plot, immediately after the weeding operation of the LT system in each growing season. The determination of the CI, was accompanied by the reading of the soil moisture ( $H_v$ , % volume) obtained with a meter portable moisture (Field Scout TDR 300 Soil Moisture Meter, Spectrum® Technologies, Inc, Aurora IL, USA), 12 and 20 cm deep.

#### Average infiltration rate

The average infiltration rate (AIR), was determined in the plots of each system, before the start of tillage operations in each agricultural cycle, according to the method of double cylinder infiltrometer proposed by Anaya (1977), and considering the modified formula by Porta *et al.* (1999):  $AIR = V / (A \cdot T)^{0.5}$  where V is the volume of water (ml), A the area of the internal cylinder (cm<sup>2</sup>) and infiltration time t (min).

#### Grain yield

In order to evaluate the performance, we established in the experimental plots of hybrid maize (*Zea mays* L., cv. Aspro® AS-722), under a double row under rainfed conditions in the

### Velocidad media de infiltración

La velocidad media de infiltración (VMI), se determinó en las parcelas de cada sistema, previo al inicio de operaciones de labranza en cada ciclo agrícola, de acuerdo con el método del infiltrómetro de doble cilindro propuesto por Anaya (1977), y considerando la fórmula modificada de Porta *et al.* (1999):  $VMI = V(A \cdot t)^{-1}$ , donde  $V$  es volumen de agua (mL),  $A$  el área del cilindro interno ( $cm^2$ ) y  $t$  el tiempo de infiltración (min).

### Rendimiento de grano

Para evaluar el rendimiento, se estableció en las parcelas experimentales un cultivar de maíz híbrido (*Zea mays* L., cv. Aspro® AS-722), bajo un arreglo de doble hileras y condiciones de secano, en la primera semana de abril de cada ciclo agrícola del periodo experimental. La densidad de siembra fue de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  con una distancia entre plantas de 0.15 m. El tratamiento de fertilización para todos los sistemas consistió de una dosis de 120-60-30 (N, P, K) unidades, aplicadas en la siembra. Como componente del rendimiento ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), se consideró el peso de mil granos de la parcela útil (cuatro surcos centrales de 10 m de longitud), en cada ciclo agrícola.

### Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados mediante un análisis de varianza (ANOVA), empleando software Statistical Analysis System, USA (SAS). Todos los parámetros fueron analizados con un mínimo de tres repeticiones y probados por significancia entre tratamientos ( $p < 0.05$ ). Cuando se encontraron diferencias significativas, se utilizó la prueba de Tukey para determinar la diferencia entre medias.

## Resultados y discusión

### Propiedades químicas del suelo

Después de un periodo efectivo de dos años del establecimiento de los sistemas de labranza, los valores en 2011 de las propiedades químicas básicas del horizonte de cultivo, fueron similares en todos los sistemas (Cuadro 2). Según la determinación de la fertilidad del suelo de la NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), este se clasifica

first week of April each agricultural cycle of the experimental period. The seeding rate was  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  with a distance of 0.15 m between plants. Fertilization treatment for all systems consisted of a dose of 120-60-30 (N, P, K) units, applied at planting. As a component of yield ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ), the weight of a thousand grains of useful plot (four central rows of 10 m length) in each agricultural cycle was considered.

### Statistical analysis

The data obtained were analysed by ANOVA using the software Statistical Analysis System, USA (SAS). All parameters were analysed with a minimum of three replicates and tested for significance between treatments ( $p < 0.05$ ). When significant differences were found, the Tukey test was used in order to determine the difference between them.

## Results and discussion

### Soil chemical traits

After a period of two years of effective establishment of tillage systems, values in 2011 of the chemical traits of the horizon of the crop were similar in all systems (Table 2). As determined by soil fertility NOM-021-SEMARNAT-2000 (2002), this is classified as moderately acidic, with an average nutrient reserves and negligible effects of salinity (based on CIC and EC). The LC reported lower  $N$  content than other tillage systems (28% less on average); however, the  $N$  content of the LC is classified as high for non-volcanic soils (0.15 - 0.25%  $N$ ) compared to very high ( $> 0.25\% N$ ) of LM and LT. Although there are significant differences in the content of MO between each system, all values reported for non-volcanic soils, high in the horizon of the crop ( $> 6\%$ ). The different contents of MO in the three tillage systems showed that, since the establishment of the LM and LC in the experimental area (two years), the use of the subsoiler in LM, did not efficiently incorporated maize stover of the crop cycles 2009 and 2010, and for the plots of LC, the stubble remained on the surface as a cushioning material. The highest value of MO for LT, can be explained by the incorporation of organic material from the previous growing season, by the action of turning the plow itself.

como moderadamente ácido, con una reserva nutrimental media y efectos despreciables de salinidad (con base en la CIC y CE). La LC reportó un menor contenido de *N* que los demás sistemas de labranza (28% menor, en promedio); no obstante, el contenido de *N* de la LC se clasifica como alto para suelos no volcánicos (0.15-0.25% *N*), en comparación con contenido muy alto (>0.25% *N*) de la LM y LT. Apesar de existir diferencias significativas en el contenido de MO entre cada sistema, todos reportaron valores, para suelos no volcánicos, muy altos en el horizonte de cultivo (>6%). Los diferentes contenidos de MO en los tres sistemas de labranza, muestran que desde el establecimiento de la LM y LC en el área experimental (dos años), el empleo del subsolador en LM no incorporó eficientemente el rastrojo de maíz de los ciclos de cultivo 2009 y 2010, y que para las parcelas de LC, dicho rastrojo permaneció en la superficie como material de acolchado. El valor más alto de MO para la LT, puede explicarse por la incorporación de material orgánico del ciclo de cultivo anterior, por la acción de volteo propia del arado.

#### Densidad aparente

Los valores promedio de la densidad aparente de los diferentes sistemas de labranza, durante los ciclos agrícolas primavera-verano 2010-2012, mostraron (Cuadro 3) que, con la excepción de la LT en el ciclo 2011, en todos los ciclos y sistemas, la *D<sub>a</sub>* se incrementó con la profundidad y el mayor valor se presentó en la capa más profunda. El mayor incremento de *D<sub>a</sub>* entre capas de profundidad (7.4%) fue observado en LT durante el primer ciclo de cultivo. También en 2010, la LC presentó los mayores valores de *D<sub>a</sub>* en ambas capas de profundidad en comparación con los demás sistemas; esto confirma los resultados de investigaciones previas, donde se reportan mayores valores de compactación al establecer sistemas de cero labranza, en comparación con la labranza mínima y tradicional (Benito *et al.*, 1999; Tormena *et al.*, 2002). Para el segundo ciclo de cultivo, se observó una marcada disminución en los valores de *D<sub>a</sub>* comparados con los del primer año, valores que además se mantuvieron constantes para todos los sistemas y profundidades en el tercer ciclo.

Las razones de dicho comportamiento no resultan evidentes. Con la excepción de la LT en 2010 (0-15 cm), no se observaron diferencias significativas entre sistemas de labranza a la misma profundidad. La disminución de los valores de *D<sub>a</sub>* en ciclos de cultivo consecutivos, contradice lo reportado por Filipovic *et al.* (2006), quienes señalan

#### Cuadro 2. Propiedades químicas del suelo (0-30 cm) antes de las operaciones de labranza del 2011<sup>1</sup>.

Table 2. Chemical traits of soil (0-30 cm) before tillage operations in 2011<sup>1</sup>.

|   | LM                | LC                | LT                |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|
| pH  | 5.6 <sup>a</sup>  | 5.6 <sup>a</sup>  | 5.8 <sup>a</sup>  |
| CIC (cmol <sup>+</sup> kg <sup>-1</sup> ) | 22.5 <sup>a</sup> | 20.5 <sup>a</sup> | 23.8 <sup>a</sup> |
| CE (dS m <sup>-1</sup> )                  | 0.6 <sup>a</sup>  | 0.5 <sup>a</sup>  | 0.8 <sup>a</sup>  |
| Nitrogeno total (N, %)                    | 0.27 <sup>a</sup> | 0.21 <sup>b</sup> | 0.31 <sup>a</sup> |
| Materia orgánica (MO, %)                  | 6.88 <sup>b</sup> | 6.14 <sup>a</sup> | 7.56 <sup>a</sup> |

LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional; CIC= capacidad de intercambio catiónico; CE= conductividad eléctrica. <sup>1</sup>Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones, las medias en el mismo renglón seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) por la prueba de Tukey.

#### Bulk density

The average values of the bulk density of different tillage systems during the spring-summer growing seasons 2010-2012, showed (Table 3), with the exception of LT in the 2011 cycle, all cycles and systems, *D<sub>a</sub>* increased with depth and showed the highest value in the deepest layer. The highest increase in *D<sub>a</sub>* between layers deep (7.4%) was observed in LT during the first growing season. Also in 2010, the LC showed the highest values of *D<sub>a</sub>* in both layers of depth compared to the other systems; this confirms the results of previous research, where higher values of compaction are reported to establish no-tillage systems, compared to the minimum and conventional tillage (Benito *et al.*, 1999; Tormena *et al.*, 2002). For the second crop cycle, a marked decrease was observed in the values of *D<sub>a</sub>* compared to the first year, values also remained constant for all systems and depths in the third cycle.

The reasons for this behaviour are not evident. With the exception of LT in 2010 (0-15 cm), no significant differences between tillage systems at depth were observed. The decrease in the values of *D<sub>a</sub>* consecutive crop cycles, contradicts that reported by Filipovic *et al.* (2006), who point *D<sub>a</sub>* increments in subsequent cycles compared to the first year of research. The average values of *D<sub>a</sub>*, at both depths of all systems in the experimental cycle are reported below the threshold of adverse compaction (1.5 g cm<sup>-3</sup>). According to Butorac *et al.* (1992), the increase in the *D<sub>a</sub>* over this threshold on the horizon of the crop has a negative effect on growth and development of various crops.

incrementos de la  $D_a$  en ciclos subsecuentes, comparados con el primer año de investigación. Los valores promedio de la  $D_a$ , en ambas profundidades de todos los sistemas, en el ciclo experimental, se reportan por debajo del umbral de compactación adversa ( $1.5 \text{ g cm}^{-3}$ ). De acuerdo con Butorac *et al.* (1992), el incremento de la  $D_a$  sobre dicho umbral en el horizonte de cultivo, tiene un efecto negativo en el crecimiento y desarrollo de diversos cultivos.

### Resistance to penetration

The curves of the CI showed similar responses of all systems in each crop cycle (Figure 1), with a tendency to increase the value of penetration resistance at depths higher than 20 cm. These similar responses represented by a single shape of the curves for the three systems in each cycle show a homogeneity in the behaviour of penetration resistance

**Cuadro 3. Densidad aparente promedio de los sistemas de labranza durante el periodo 2010-2012<sup>a</sup>.**  
**Table 3. Average bulk density of tillage systems in 2010-2012<sup>a</sup>.**

| Sistema de labranza | Profundidad (cm) | $D_a$ ( $\text{g cm}^{-3}$ ) |                   |                   |                   |
|---------------------|------------------|------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                     |                  | 2010                         | 2011              | 2012              | 2010-2012         |
| LM                  | 0-15             | 1.57 <sup>b</sup>            | 1.31 <sup>a</sup> | 1.3 <sup>a</sup>  | 1.39 <sup>a</sup> |
|                     | 15-30            | 1.59 <sup>b</sup>            | 1.33 <sup>a</sup> | 1.32 <sup>a</sup> | 1.41 <sup>a</sup> |
| LC                  | 0-15             | 1.6 <sup>b</sup>             | 1.27 <sup>a</sup> | 1.3 <sup>a</sup>  | 1.39 <sup>a</sup> |
|                     | 15-30            | 1.64 <sup>b</sup>            | 1.32 <sup>a</sup> | 1.31 <sup>a</sup> | 1.42 <sup>a</sup> |
| LT                  | 0-15             | 1.49 <sup>a</sup>            | 1.33 <sup>a</sup> | 1.32 <sup>a</sup> | 1.38 <sup>a</sup> |
|                     | 15-30            | 1.6 <sup>b</sup>             | 1.28 <sup>a</sup> | 1.31 <sup>a</sup> | 1.4 <sup>a</sup>  |

LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional;  $D_a$ = densidad aparente. <sup>a</sup>Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) por la prueba de Tukey.

### Resistencia a la penetración

Las curvas del IC mostraron respuestas similares de todos los sistemas en cada ciclo de cultivo (Figura 1), con una tendencia a incrementar el valor de resistencia a la penetración a profundidades mayores de 20 cm. Estas respuestas similares, representadas por una misma forma de las curvas para los tres sistemas en cada ciclo, reflejan una homogeneidad en el comportamiento de resistencia a la penetración independientemente del tratamiento de labranza. El incremento en los valores de resistencia al aumentar la profundidad, se atribuye usualmente a la presencia de una discontinuidad vertical entre el horizonte de labranza y el subsuelo sin labor (Gliński y Lipiec, 1990).

En todos los ciclos de cultivo del periodo experimental, la LC presentó la mayor resistencia a la penetración promedio con respecto a los demás sistemas de labranza (Cuadro 4). Ferreras *et al.* (2000), también reportaron una mayor resistencia significativa del penetrometro, de la superficie hasta 20 cm de profundidad, bajo cero-labranza que en labranza convencional. Para 2010 y 2012, no se observaron diferencias significativas del IC entre LM y LT.

Las diferencias anuales en los valores de IC de cada sistema, pueden atribuirse a la variación en el contenido de  $H_o$  presente en cada parcela durante los distintos ciclos

independent of treatment implements. The increase in resistance values with increasing depth is usually attributed to the presence of a vertical discontinuity between the horizon and subsoil tillage without work (Gliński and Lipiec, 1990).

In all growing cycles of the experimental period, the LC had the highest average penetration resistance compared to other tillage systems (Table 4). Ferreras *et al.* (2000) also reported a significantly higher penetrometer resistance of the surface to 20 cm deep, zero-tillage than under conventional tillage. For 2010 and 2012, no significant differences between CI between LM and LT were observed.

The annual differences in CI values of each system can be attributed to the variation in the content of  $H_o$  present in each plot during the different stages of cultivation of the experimental period. The  $H_o$  in the surface layer (12 cm) was lower in LC and LM in LT (26% less on average), 20 cm deep, the LT  $H_o$  also reported the highest (27% higher on average) (Table 4). The high content of  $H_o$  in both layers of LT, can be explained by the higher level of water infiltration caused by farming activity in a relatively weak soil structure; this confirms the results of Carter *et al.* (1991), who argued that, in order to achieve a conductive state for water infiltration, it requires tillage operations to operate in areas with road traffic.

de cultivo del periodo experimental. La Ho en la capa superficial (12 cm) fue menor en LC y LM que en LT (26% menor en promedio), a 20 cm de profundidad, la LT también reportó la mayor Ho (27% mayor en promedio) (Cuadro 4). El alto contenido de Ho en ambas capas de la LT, puede explicarse por el mayor nivel de infiltración del agua originado por la actividad de labranza en una estructura del suelo relativamente débil; esto confirma los resultados de Carter *et al.* (1991), quienes sostienen que, para lograr un estado conductivo para la infiltración del agua, se requiere de operaciones de labranza en superficies donde opere tránsito rodado.

Lipiec y Hatano (2003), afirman que los valores críticos de resistencia a la penetración que detienen el crecimiento de la raíz varían de 3 000 a 4 000 kPa. En el experimento, se observaron valores promedio superiores a los 3 000 kPa, principalmente en LM y LC durante los primeros dos ciclos agrícolas. Los resultados del presente estudio sugieren que el empleo de aperos de labranza reduce la resistencia a la penetración en el horizonte de cultivo. Erbach *et al.* (1992), también reportaron resultados similares para no-labranza, con valores de resistencia a la penetración superiores a los de labranza con arado de vertedera y martillo.

#### Velocidad media de infiltración

Se encontró un efecto significativo del sistema de labranza sobre la VMI (Cuadro 5). Para todos los ciclos de cultivo, la mayor VMI se registró en LT y difirió significativamente de las tasas obtenidas en LM y LC. Por otro lado, en todos los casos, las VMI en LC siempre fueron significativamente menores que las de los demás sistemas. Los resultados muestran que las operaciones de labranza en el vertisol de estudio favorecen la infiltración de agua. Lo anterior resulta evidente, ya que la VMI en LT fue casi dos veces más alta que en LC. Gagli *et al.* (2005), observaron efectos similares de mayor conductividad hidráulica a nivel superficial (20 - 30 cm), en tratamientos de labranza convencional con arado de discos, que en tratamientos de labranza mínima utilizando arado de vertederas. Otro factor que apoya dicho resultado, es el mayor contenido de MO de la LT en comparación con los demás sistemas (Cuadro 2). Esto confirma lo reportado por Reddy (1991), donde se aprecian incrementos en la tasa de infiltración del agua de 0.4 cm h<sup>-1</sup> debido a la incorporación de materia orgánica.

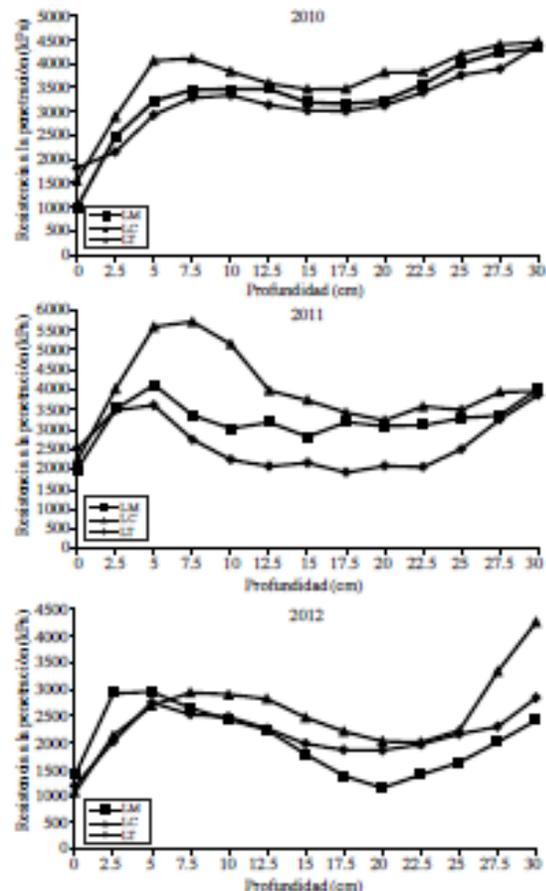


Figura 1. Curvas del comportamiento del índice de cono en sistema de labranza mínima (LM), cero (LC) y tradicional (LT) durante tres ciclos de cultivo consecutivos.

Figure 1. Curves of the behaviour of cone index in tillage system: minimum (LM), zero (LC) and traditional (LT) for three consecutive crop cycles.

Lipiec and Hatano (2003) stated that the critical values of penetration resistance that stop root growth vary from 3 000 to 4 000 kPa. In the experiment, we observed higher than 3 000 kPa, mainly in LM and LC during the first two growing seasons mean values. The results of this study suggest that the use of tillage reduces penetration resistance on the horizon the crop. Erbach *et al.* (1992) also reported similar results for no-tillage, with resistance values higher than moldboard plow tillage and cock penetration.

**Cuadro 4. Resistencia a la penetración y contenido de humedad del suelo promedio en los sistemas de labranza durante cada ciclo de cultivo<sup>1</sup>.****Table 4. Resistance to penetration and average moisture content of soil tillage systems during each crop cycle<sup>1</sup>.**

| Sistema de labranza | Profundidad (cm) | Ho (%) | IC (0-30 cm, kPa) |                   |                   |                   |
|---------------------|------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                     |                  |        | 2010              | 2011              | 2012              | 2010-2012         |
| LM                  | 12               | 21.5   | 3287 <sup>a</sup> | 3234 <sup>b</sup> | 2028 <sup>a</sup> |                   |
|                     | 20               | 35.6   |                   |                   |                   | 2850 <sup>b</sup> |
| LC                  | 12               | 20.5   | 3659 <sup>b</sup> | 3998 <sup>b</sup> | 2547 <sup>b</sup> | 3401 <sup>a</sup> |
|                     | 20               | 27.9   |                   |                   |                   |                   |
| LT                  | 12               | 25     | 3167 <sup>a</sup> | 2659 <sup>a</sup> | 2171 <sup>a</sup> | 2666 <sup>a</sup> |
|                     | 20               | 38.1   |                   |                   |                   |                   |

LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional; Ho= humedad volumétrica; IC= índice de cono. <sup>1</sup>Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) por la prueba de Tukey.

**Cuadro 5. Velocidad de infiltración del agua promedio en cada sistema de labranza durante tres ciclos de cultivo anuales consecutivos<sup>1</sup>.****Table 5. Speed infiltration of average water in each tillage system for three consecutive crop cycles per year<sup>1</sup>.**

| Sistema de labranza | VMI (mL cm <sup>-2</sup> min <sup>-1</sup> ) |                    |                    |                    |
|---------------------|--|--------------------|--------------------|--------------------|
|                     | 2010   | 2011               | 2012               | 2010-2012          |
| LM                  | 0.084 <sup>b</sup>                           | 0.086 <sup>b</sup> | 0.093 <sup>b</sup> | 0.088 <sup>b</sup> |
| LC                  | 0.043 <sup>a</sup>                           | 0.044 <sup>a</sup> | 0.047 <sup>a</sup> | 0.045 <sup>a</sup> |
| LT                  | 0.115 <sup>c</sup>                           | 0.121 <sup>c</sup> | 0.123 <sup>c</sup> | 0.12 <sup>c</sup>  |

VMI= velocidad media de infiltración; LM= labranza mínima; LC= labranza cero; LT= labranza tradicional. <sup>1</sup>Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) por la prueba de Tukey.

#### Rendimiento de grano

Los sistemas de labranza tuvieron un efecto significativo en los valores de rendimiento (Cuadro 6). En todos los ciclos de cultivo, los rendimientos más altos se obtuvieron con LM, aunque para 2010 y 2012 estos fueron estadísticamente similares a los de la LT. Los rendimientos de LM y LT, pueden atribuirse al mayor contenido de Ho y menor nivel de IC en ambos sistemas. De acuerdo con el SIAP (2014), los resultados para todos los sistemas en 2010 y 2011, fueron superiores a los promedios reportados para el distrito agrícola en los años correspondientes (49% mayor en 2010 y 155% mayor para 2011). La pérdida de rendimiento observada en 2012 en todos los sistemas, se debió a una escasa germinación ocasionada por severos encharcamientos en el área experimental. La obtención en LM de rendimientos superiores a LT anualmente (10% en promedio anual y 14% durante todo el periodo experimental), difieren de los resultados de Sartori y Peruzzi (1994), quienes reportaron una producción de maíz con métodos de LM, inferiores en 20-25% a los basados en el arado, así mismo, Borin y Sartori (1995), reportaron que entre labranza convencional, mínima y no-labranza, el mayor rendimiento fue obtenido con labranza convencional.

#### Average infiltration rate

A significant effect of tillage systems on the AIR (Table 5) was found. For all crop cycles, as recorded in AIR and LT differ significantly from the rates obtained in LM and LC. Furthermore, in all cases, the AIR LC were always significantly lower than other systems. The results show that tillage operations in the study of vertisol favour water infiltration. This is evident, as the AIR in LT was almost twice higher than in LC. Gagli et al. (2005) observed similar effects from higher hydraulic conductivity at surface (20-30 cm) in treatments of conventional tillage with plow discs and minimum tillage treatments using moldboard plow. Another factor supporting this result is the higher content of MO LT compared with the other systems (Table 2). This confirms the results reported by Reddy (1991), where increases are seen in the rate of infiltration of 0.4 cm h<sup>-1</sup> due to the incorporation of organic matter.

#### Grain yield

Tillage systems had a significant effect on the yield values (Table 6). In all crop cycles, the highest yields were obtained with LM, but for 2010 and 2012 these were statistically

**Cuadro 6. Rendimiento de grano promedio en tres sistemas de labranza durante el periodo 2010-2012<sup>1</sup>.**  
**Table 6. Average grain yield in three tillage systems in 2010-2012<sup>1</sup>.**

| Sistema de labranza | Rendimiento (Mg ha <sup>-1</sup> ) |                  |                  |                  |
|---------------------|------------------------------------|------------------|------------------|------------------|
|                     | 2010                               | 2011             | 2012             | 2010-2012        |
| LM                  | 6.2 <sup>a</sup>                   | 6.4 <sup>a</sup> | 3.4 <sup>a</sup> | 5.3 <sup>a</sup> |
| LC                  | 3.9 <sup>b</sup>                   | 4.5 <sup>a</sup> | 1.9 <sup>b</sup> | 3.4 <sup>b</sup> |
| LT                  | 5.6 <sup>a</sup>                   | 5.2 <sup>b</sup> | 3 <sup>a</sup>   | 4.6 <sup>a</sup> |

LM= labranza mínima, LC= labranza cero, LT= labranza tradicional. <sup>1</sup>Cada valor es el promedio de al menos tres observaciones; las medias en la misma columna seguidas por distintas letras son significativamente diferentes ( $p < 0.05$ ) por la prueba de Tukey.

## Conclusiones

El análisis conjunto de los parámetros comunes que caracterizan a la compactación del suelo (densidad aparente, dureza del suelo o resistencia a la penetración y velocidad de infiltración), permitió determinar, con mayor certeza, los factores que la originan, así como describir con precisión su desarrollo en el tiempo. En este sentido, el análisis individual de la densidad aparente, no permitió determinar cambios en la compactación del suelo por el efecto de los sistemas de labranza en el periodo de estudio.

Las características físicas inherentes al vertisol del área de estudio, no permitieron determinar en el corto plazo, tendencias claras en el incremento o remediación de los parámetros de compactación del suelo bajo diversos sistemas de labranza.

La VMI fue el único parámetro que presentó incrementos constantes durante cada ciclo consecutivo del periodo experimental en todos los sistemas de labranza, siendo la LM donde se observó el mayor incremento.

Durante el periodo de estudio, la adopción del sistema de LC para el cultivo de maíz, no representó ventajas en cuanto al rendimiento y remediación de la compactación del suelo, en comparación con los sistemas de LM y LT.

Se recomienda que la adopción de sistemas de labranza alternos al sistema tradicional en el área de estudio, deberá fundamentarse en los resultados de investigaciones a mediano y largo plazo, para determinar con precisión las ventajas que representan dichos sistemas, en cuanto a remediación de la compactación e incrementos en el rendimiento. No obstante, la adopción del sistema de LM en el área de estudio, podría representar, a corto plazo, mayores beneficios en la relación costo-beneficio del cultivo de maíz.

similar to those of the LT. Yields on LM and LT, can be attributed to the higher content of Ho and lower levels of CI in both systems. According to the SIAP (2014), the results for all systems in 2010 and 2011 were higher than the averages reported for the agricultural district in the corresponding years (49% higher in 2010 and 155% higher in 2011). Yield loss observed in 2012 in all systems, is due to poor germination caused by severe waterlogging in the experimental area. Higher yields in LM than those of the LT annually (10% average and 14% throughout the experimental period), differ from the results reported by Sartori and Peruzzi (1994), who stated maize production methods of LM, 20-25% lower than those based on the plow; also, Borin and Sartori (1995) reported that between conventional tillage, minimum and no-tillage, the highest yield was obtained with conventional tillage.

## Conclusions

The set of common parameters that characterize soil compaction (bulk density, soil strength or penetration resistance and infiltration rate) analysis allowed us determining with better certainty, the factors that cause it and accurately describe its development over time. In this sense, the individual analysis of the bulk density did not allowed to calculate changes in soil compaction by the effect of tillage systems in the study period.

Inherent physical characteristics of vertisol of the study area, did not make possible to determine in the short term, clear trends in the increase or remediation of soil compaction parameters under different tillage systems.

The AIR was the only parameter which showed steady increases during each consecutive cycle of the experimental period in all tillage systems, being LM with the largest increase was observed.

## Agradecimientos

Esta investigación fue desarrollada bajo los auspicios del proyecto: 2959/2010SF de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), y financiada por beca del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), de México.

## Literatura citada

- 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.* 37:211-222.
- Anaya, M. 1977. Manejo de cultivos y suelos en las zonas áridas y semiáridas de México. FAO/SIDA. Lima, Perú. Reunión taller sobre conservación de suelos y manejo de las tierras. 121-122 pp.
- Benito, A.; Sombroero, A. and Escribano, C. 1999. The effect of conservation tillage on soil properties. *Agric. Rev. Agropec.* 68:538-541.
- Borin, M. and Sartori, L. 1995. Barley, soybean and maize production using ridge tillage, no-tillage and conventional tillage in north-east Italy. *J. Agric. Eng. Res.* 62:229-236.
- Butorse, A.; Basic, F.; Tursic, I. and Mesic, M. 1992. The response of some field crops to soil compaction. In: proceedings of the 12<sup>th</sup> ISTRO conference. Tallin, Estonia. 276-285 pp.
- Carter, L. M.; Meek, B. D. and Rechel, E. A. 1991. Zone production system for cotton, soil response. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.* 34:354-360.
- Erbach, D. C.; Benjamin, J. G.; Cruser, R. M.; Elamin, M. A.; Mukhtar, S. and Choi, C. H. 1992. Soil and corn response to tillage with para plow. *Transactions of ASAE.* 35:1347-1354.
- Ferreras, L. A.; Costa, J. L.; García, F. O. and Peonari, C. 2000. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern Pampa of Argentina. *Soil Tillage Res.* 54:31-39.
- Filipovic, D.; Huznjak, S.; Kosutic, S. and Gospodaric, Z. 2006. Effects of tillage systems on compaction and crop yield of Albic Luvisol in Croatia. *J. Terramechanics.* 43:177-189.
- Glinski, J. and Lipiec, J. 1990. Soil physical conditions and plant roots. CRC Press. Boca Raton, FL. 250 p.
- Güçlün, H.; Mathies, D. and Auerhammer, H. 2005. Vulnerability of Bavarian silty loam soil to compaction under heavy wheel traffic: impacts of tillage method and soil water content. *Soil Tillage Res.* 84:200-215.
- Hamza, M. A. and Anderson, W. K. 2005. Soil compaction in cropping systems a review of the nature, causes and possible solutions. *Soil Tillage Res.* 82:121-145.
- Honson, I. and Reeder, R. C. 1994. Subsoil compaction by vehicles with high axle load—extent, persistence and crop response. *Soil Tillage Res.* 29(2-3):277-304.
- During the study period, the adoption of CR system for cultivation of maize did not represent advantages in yield and remediation of soil compaction compared to the LM and LT systems.
- It is recommended that, the adoption of alternative systems to the traditional system in the study area should be based on the research results in the medium and long term to accurately determine the benefits arising from those systems, in terms of remediation compaction and increased yield. However, the adoption of the LM system in the study area could represent the short term, with better benefits in cost-benefit ratio of the maize crop.

*End of the English version*



- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2009. *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Toluca, México. Clave geoestadística 15106. INEGI. México.
- Lipiec, J. and Hatano, R. 2003. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. *Geoderma.* 116:107-136.
- Mosaddeghi, M. R.; Hajabbasi, M. A.; Hemmat, A. and Afyuni, M. 2000. Soil compactibility as affected by soil moisture content and farmyard manure in central Iran. *Soil Tillage Res.* 55:87-97.
- Muñoz-Villalobos, J. A.; Oleschko-Lutkova, K.; Velásquez-Valle, M. A.; Velásquez-García, J. de J.; Martínez-Menes, M. y Figueroa-Sandoval, B. 2011. Propiedades físicas de un Andosol Mólico bajo labranza de conservación. *Rev. Mex. Cienc. Agric.* 1:151-162.
- 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 (segunda sección) (consultado diciembre, 2002)*. México, 85 p.
- Panayiotopoulos, K. P.; Papadopoulos, C. P. and Hatjioannidou, A. 1994. Compaction and penetration resistance of an Alfisol and Entisol and their influence on root growth of maize seedlings. *Soil Tillage Res.* 31:323-337.
- Pillai, U. P. and McGarry, D. 1999. Structure repair of a compacted Vertisol with wet-dry cycles and crops. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63:201-210.
- Porta, J.; López-Acevedo, M. y Roquero, C. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Mundi-Prensa. 2ª (Ed.). Bilbao, España. 330-339 pp.
- Radford, B. J.; Yule, D. F.; McGarry, D. and Playford, C. 2007. Amelioration of soil compaction can take 5 years on a Vertisol under no till in the semi-arid subtropics. *Soil Tillage Res.* 97:249-255.
- Raper, R. L.; Reeves, D. W. and Burt, E. C. 1998. Using in-row subsoiling to minimize soil compaction caused by traffic. *J. Cotton Sci.* 2:130-135.

- Reddy, M. S. 1991. Effects of soil amendments on the hardening of red sandy loams (chalka soils) of Andhra Pradesh. *Ann. Agric. Res.* 12:174-176.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014. Anuario estadístico de la producción agrícola. Estado de México, Distrito de Toluca, ciclo primavera - verano 2010, 2011; modalidad: temporal (consultado agosto, 2014). <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-phihttp://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/cultivo/>.
- Soane, B. D. and Van Otterloo, C. 1995. Implications of soil compaction in crop production for the quality of the environment. *Soil Tillage Res.* 35:5-22.
- Soil Science Society of America (SSSA). 2013. *Glossary of soil science terms*. Madison, WI, USA. 92 p.
- Tardieu, F. 1994. Growth and functioning of roots and root systems subjected to soil compaction towards a system with multiple signaling. *Soil Tillage Res.* 30:217-243.
- Torrena, C. A.; Barbosa, M. C.; Costa, A. C. S. and Gonçalves, A. C. A. 2002. Soil bulk density, porosity and resistance to root penetration in an oxisol managed by different soil tillage systems. *Scientia Agricola* 59:795-801.
- Versa, E. C.; Chong, S. K.; Abolaji, J. O.; Farquhar, D. A. and Olsen, F. J. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristic and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil Tillage Res.* 43:219-228.
- Weise, G. and Bournach, E. H. 1999. Tillage Machinery. *In: CIGR handbook of agricultural engineering. Plant production engineering*. ASAE. St. Joseph. (3).

## VIII. Discusión general

Los resultados relacionados con el contenido de humedad (gravimétrica; en el artículo de Terra Latinoamericana) de las muestras de suelo de los diferentes sistemas de labranza en 2011, en los que la LT presentó los valores más altos para ambos horizontes, hizo suponer que dichos valores pudieran atribuirse a una menor velocidad de infiltración y, consecuentemente, a una mayor retención de agua por parte de dicho sistema. A pesar de que ésta suposición fue corroborada con una prueba de VMI efectuada a la par de la toma de muestras para determinar la humedad, las pruebas de VMI realizadas antes de las operaciones de labranza, durante todo el periodo experimental, arrojaron resultados contradictorios. Esto parece indicar que el momento de aplicación de la prueba de velocidad tuvo influencia directa sobre los resultados; en este sentido van Dijck y van Asch (2002), sostienen que las características de retención de agua están directamente relacionadas con la distribución del espacio poroso en el subsuelo ocasionado por el tránsito de maquinaria, por lo que la mayor humedad en LT, así como el comportamiento de la VMI para ese momento determinado, más bien pudieran atribuirse a la modificación del espacio poroso debido al pase de maquinaria de la operación de escarda.

La evolución de la compactación para las condiciones dadas en el sitio experimental, concuerdan con lo propuesto por Weber *et al.* (2000), en el sentido de que los suelos con bajo contenido de humedad sometidos a labranza “simplificada”, no tienen influencia en la densidad aparente hasta los 30 cm de profundidad.

El tipo de sonda empleada para la prueba de resistencia a la penetración en la máquina universal de prueba, así como el método de obtención de muestras, podría relacionarse con la aparente falta de correlación de los valores promedio para esta variable en ambas etapas experimentales, no obstante, en un análisis posterior, en los que se compararon valores de resistencia e IC de las dos etapas para las mismas profundidades de muestreo, se obtuvo un valor de correlación entre variables de 0.888, esto implica que el ensayo en la máquina universal de prueba puede validarse para el mismo nivel de profundidad con la metodología tradicional que emplea un penetrómetro digital.

## IX. Conclusión general

Para los ensayos de compresión uniaxial en la máquina universal de prueba, se sugiere encaminar la experimentación para determinar los niveles óptimos de deformación relativa aparente de las muestras de suelo, con el fin de que los resultados de los ensayos correspondientes a la prueba de compresión de doble ciclo, se correlacionen positivamente con la prueba de resistencia a la penetración. Asimismo, con relación a la prueba de resistencia a la penetración, cabe señalar que los resultados son comparables a los de la metodología tradicional, en este caso a las lecturas del penetrometro digital, únicamente para los mismos niveles de profundidad.

Es difícil afirmar que una sola práctica agronómica puede solucionar un problema de compactación del suelo. En su lugar, se sugiere la implementación de un sistema de labranza alterno al tradicional, que involucre una combinación de prácticas tales como: labranza mínima o cero, la combinación de más de una operación agrícola simultánea utilizando la misma maquinaria para minimizar el número de pases, conservación de cobertura vegetal, subsoleo para romper el piso de arado y el aporte de materia orgánica, con el fin de mitigar o retrasar la aparición del problema. Para el caso particular del *Vertisol* de la zona experimental, se observó que bajo las condiciones experimentales dadas y un patrón de clima regular, el sistema de labranza cero no presentó ventajas a corto plazo, en cuanto a la remediación de los indicadores de compactación ni en el rendimiento de grano. Por otra parte, la adopción de un sistema de labranza mínima podría representar ventajas inmediatas comparado con un sistema de labranza tradicional, como son: reducciones en los costos operativos debido al menor número de pases de maquinaria y aumentos marginales en los rendimientos del cultivo.

## X. Referencias bibliográficas

1. 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.* 37:211-222.
2. Aguilera C., M. y R. Martínez E. 1996. Relaciones agua suelo planta atmósfera. 4ª ed. UACH, Chapingo, México. p. 67-80.
3. ASABE. 2008a. Standard S313.3: Soil Cone Penetrometer. ASABE, St. Joseph, MI.
4. ASABE. 2008b. Engineering practice 542: Procedures for using and reporting data obtained with the soil cone penetrometer. ASABE, St. Joseph, MI.
5. Benites, J.R. 1992. Clasificación de los sistemas de labranza. *In: Manual de sistemas de labranza para América Latina.* FAO, Roma, Italia. p. 7-8.
6. Carter, L. M.; Meek, B. D. and Rechel, E. A. 1991. Zone production system for cotton, soil response. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers.* 34:354-360.
7. Dawidowski, J.B., Lerink, P. 1990. Laboratory simulation of the effects of traffic during seedbed preparation on soil physical properties using a quick uni-axial compression test. *Soil & Till. Res.* 17: 31-45.
8. Dobraszczyk, B. J., Vincent, J.F. 2001. Medida de las propiedades mecánicas de materiales alimentarios en relación con la textura: enfoque de materiales. *In: Textura de los alimentos. Medida y percepción.* Rosenthal, A.J. (ed). ACRIBIA, Zaragoza, España. p. 141-143.
9. De la Peña, I. 1977. El buen uso y manejo del agua de riego. Boletín técnico no. 8 del Comité Directivo del Distrito de Riego. No. 28-41. Oficina de Riego y Drenaje. Cd. Obregón, Sonora, México.
10. DIY Trade ®. 2011. Texture analyser TA.XT. (En línea). Disponible en: [http://www.diytrade.com/china/2/products/2642179/%E7%89%A9%E6%80%A7%E6%B5%8B%E8%AF%95%E4%BB%AA\\_texture\\_analyser\\_TA\\_XT.html](http://www.diytrade.com/china/2/products/2642179/%E7%89%A9%E6%80%A7%E6%B5%8B%E8%AF%95%E4%BB%AA_texture_analyser_TA_XT.html). (Revisado el 06 de septiembre de 2011).
11. Ericsson, M.L., Lindberg, H. 1996. A method of measuring energy dissipation during crack propagation with an instrumented microtome. *J. Mat. Sci.* 31, 655-662.
12. Filipovic, D.; Husnjak, S.; Kosutic, S. and Gospodaric, Z. 2006. Effects of tillage systems on compaction and crop yield of Albic Luvisol in Croatia. *J. Terramechanics.* 43:177-189.
13. Food and Agriculture Organization (FAO) – Centro Internacional de Referencia e Información en Suelos y Sociedad Internacional de las Ciencias del Suelo (ISRIC y SICS). 1999. Base Referencia Mundial del Recurso Suelo. Reporte No. 84. Roma, Italia.

14. Flowers, M. and Lal, R. 1998. Axle load and tillage effect on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. *Soil & Tillage Research*. 48(1998):21-35.
15. Gasca-Mancera, J. C. and N.B. Casas-Alencáster. 2007. Addition of nixtamalized corn flour to fresh nixtamalized corn masa. Effect on the textural properties of masa and tortilla. *Revista Mexicana de Ing. Quím.* 3: 317-328.
16. Giasson, E. 2000. Efecto de la labranza sobre las características físicas del suelo. *In: Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Chalk, L. (ed.). FAO, Roma, Italia. p. 53-57.
17. Gutiérrez R., F. 2010. Máquinas para la preparación primaria de suelos. *In: Gutiérrez R., F. y Serrato C., R. Fundamentos de los implementos y de las máquinas agrícolas*. UAEM, Toluca, México. p. 32-39.
18. Hamza, M.A. and Anderson, W.K. 2005. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*. 82(2005):121-145.
19. Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Toluca, México. Clave geoestadística 15106. INEGI. México.
20. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2010. La clasificación FAO-WRB y los suelos del Estado de México. INIFAP, D.F., México. 159 pp.
21. International Union of Soil Science. 2006. World reference base for soil resources. A framework for international classification, correlation and communication. 2ª ed. World Soil Resources Report No. 103. Rome, Italy.
22. Landeros, F. V. y C. R. Serrato. 2001. Instructivo para análisis de suelos. Propiedades físicas. UAEM, Toluca, México.
23. Koolen, A.J. 1987. Deformation and compaction of elemental soil volumes and effects on mechanical soil properties. *Soil & Till. Res.* 10: 5-19.
24. Mannering, J.V., Fenster, C.R. 1983. What is conservation tillage. *J. Soil and Water Conservation*. 38: 141-143.
25. Naderman, G. y N.J. Vieira. 1992. Labranza de conservación. *In: Manual de sistemas de labranza para América Latina*. FAO, Roma, Italia. p. 32.
26. Narro F., E. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Trillas, D.F., México. p. 15-72.

27. 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 (Segunda Sección), Martes 31 de diciembre de 2002, México, 85 p.
28. Ortiz-Cañavate, J. y J.L. Hernanz. Técnica de la mecanización agraria. 3ª ed. Mundi-Prensa, Madrid, España. p. 133-154.
29. Ortiz V., B. y C.A. Ortiz S. 1980. Edafología. 3ª ed. UACH, Chapingo, México. p. 22, 30, 66, 73-75.
30. O'Sullivan, M.F. 1992. Uniaxial compaction effects on soil physical properties in relation to soil type and cultivations. *Soil & Till. Res.* 24: 257-269.
31. Poesse, G.J. 1992. Soil compaction and new traffic systems. In: Possibilities Offered by New Mechanization Systems to Reduce Agricultural Production Costs. Pellizzi, G.; Bodria, L.; Bosma, A.H.; Cera, M.; Baerdemaeker, J. de.; Jahns, G.; Knight, A.C.; Patterson, D.E.; Poesse, G.J. and Vitlox, O. (eds.). The Netherlands. 79-91 pp.
32. Porta C., J., M. López-Acevedo R. y C. Roquero de L. 1999. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 2ª ed. Mundi-Prensa, Bilbao, España. p. 462.
33. Radford, B. J.; Yule, D. F.; McGarry, D. and Playford, C. 2007. Amelioration of soil compaction can take 5 years on a Vertisol under no till in the semi-arid subtropics. *Soil Tillage Res.* 97:249-255.
34. Rosenthal, A.J. 2001. Textura de los alimentos. Ed. Acribia, Zaragoza, España. p. 93, 266.
35. Sánchez-Girón, V., Andreu, E., Hernanz, J.L. 1998. Response of five types of soil to simulated compaction in the form of confined uniaxial compression tests. *Soil & Till. Res.* 48: 37-50.
36. Servicio Meteorológico Nacional. 2014. Normales climatológicas. Estado de México. Estación 00015164 Toluca (DGE).
37. Silva, V.R., Reinert, D.J., Reichert, J.M., 2000. Soil strength as affected by combine wheel traffic and two tillage systems. *Ciencia Rural.* 30: 795-801.
38. Silveira R., J.A. 1980. Máquinas agrícolas. Ed. Pueblo y Educación, Cd. De la Habana, Cuba. p. 7-8.
39. Soil Science Society of America. 1996. Glossary of Soil Science Terms. Madison, WI, USA.
40. Torcasso, F. 1992. Labranza convencional. *In: Manual de sistemas de labranza para América Latina.* FAO, Roma, Italia. p. 21-30.

41. Tullberg, J.N. 1990. Why control field traffic. In: Soil Compaction Workshop. Hunter, M.N.; Paull, C.J. and Smith, G.D. (eds). Proceedings of Queensland Department of Primary Industries. Toowoomba, Australia. 28:13-25.
42. van Dijck, S.J.E. and van Asch, W.J. 2002. Compaction of loamy soils due to tractor traffic in vineyards and orchards and its effect on infiltration in southern France. *Soil & Till. Res.* 63(2002):141-153.
43. Varsa, E. C.; Chong, S. K.; Abolaji, J. O.; Farquhar, D. A. and Olsen, F. J. 1997. Effect of deep tillage on soil physical characteristic and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil Tillage Res.* 43:219-228.
44. Vincent, J.F.V. 1991. Automating the microtome. *Microscopic Analysis*. USA. p. 19-21.
45. Weber, R., Hrynczuk, B., Biskupski, A., Wlodek, S. 2000. Variability of compaction, density and moisture of soil as depending on the tillage technique. *Inzynieria Rolnicza* 6:319-325.
46. Weise, G. and Bourarach, E. H. 1999. Tillage Machinery. *In: CIGR handbook of agricultural engineering. Plant production engineering*. ASAE. St. Joseph. (3).