

## ARTICULOS DE INVESTIGACION

### INGENIERIA AGRICOLA

#### APLICACION DEL TRAFICO CONTROLADO EN LA COSECHA DE MAIZ (*ZEA MAYS L.*): EFECTO SOBRE RENDIMIENTOS DEL CULTIVO Y LAS PROPIEDADES FISICAS DEL SUELO

#### CONTROLLED TRAFFIC APPLICATION IN CORN (*ZEA MAYS L.*) HARVEST: EFFECT ON YIELDS AND SOIL PHYSICAL PROPERTIES

Guido Botta<sup>1,2</sup>, Oscar Pozzolo<sup>3</sup>, Miguel Bomben<sup>1</sup>, Mario Tourn<sup>2</sup>, Eduardo Soza<sup>2</sup>, Héctor Rosatto<sup>2</sup>,  
Adriana Gili<sup>1</sup>, Juan Ressia<sup>4</sup>, David Rivero<sup>1</sup>, Juan Vázquez<sup>5</sup>, Soledad Stadler<sup>1</sup>,

<sup>1</sup> Facultad de Agronomía, Cátedra de Maquinaria Agrícola. Universidad Nacional de La Pampa. C.P. 6300 Santa Rosa de La Pampa, Argentina. E-mail: sad@56.dcoopenet.com.ar

<sup>2</sup> Facultad de Agronomía, Cátedra de Maquinaria Agrícola. Universidad de Buenos Aires. C.P. 1427, Buenos Aires, Argentina.

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria INTA. Estación Experimental Concepción del Uruguay. Provincia de Entre Ríos, Argentina.

<sup>4</sup> Facultad de Agronomía, Cátedra de Maquinaria Agrícola. Universidad del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Azul, Argentina.

<sup>5</sup> Depto. de Tecnología Asignatura Maquinaria Agrícola, carrera de Ingeniería Agronómica de la Universidad Nacional de Luján. Luján. Provincia de Buenos Aires, Argentina.

#### RESUMEN

Estudios previos realizados en Argentina llevaron a la recomendación de limitar el peso y la intensidad de tráfico sobre los suelos agrícolas con el fin de evitar la compactación subsuperficial y superficial especialmente en las labores de cosecha. La compactación es causada por la alta intensidad de tráfico de los tractores y máquinas durante las labores de protección del cultivo y las operaciones de cosecha en especial cuando las mismas, muchas veces, se realizan en suelos húmedos y con altas presiones en el área de contacto rueda/suelo. La técnica de siembra directa usualmente tiene intensidades de tráfico inferiores a las de la técnica convencional. El tráfico controlado es otra posibilidad utilizada para reducir la compactación del suelo. Los objetivos del presente trabajo fueron: a) Cuantificar los cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso debido al tráfico. b) Determinar la respuesta del rendimiento del cultivo de maíz relativo a diferentes alternativas de tráfico: 1) tráfico controlado en operaciones de cosecha, 2) intensidad de tráfico convencional en las operaciones de cosecha. c) Acrecentar el conocimiento presente sobre los efectos de las alternativas de tráfico en las operaciones de cosecha sobre un suelo con nueve años bajo el sistema de siembra directa. En el área de estudio, luego de aplicar durante tres años tráfico controlado en las operaciones de cosecha, el rendimiento promedio del cultivo de maíz aumentó un 33,7 %. A pesar del alto nivel de compactación inicial que poseía el suelo, se puede ver que todas las alternativas de tráfico comparadas produjeron aumentos en el índice de cono y la densidad aparente superficial del suelo generando, también, reducción en la porosidad total del mismo. Desde el punto de vista económico y después de aplicar una intensidad de tráfico de (15,2 mg km ha<sup>-1</sup>), el primer año de incremento en el rendimiento de maíz representó US\$ 161,5 ha<sup>-1</sup>, el

segundo año US\$ 195,5 ha<sup>-1</sup> y el tercero US\$ 331 ha<sup>-1</sup>. (Precio del maíz alrededor de US\$ 85 Tn). El ahorro de combustible fue de US\$ 1,35 ha<sup>-1</sup>.

**Palabras claves:** Intensidad de tráfico, compactación del suelo, siembra directa.

## ABSTRACT

Previous Argentine studies have led to a recommendation to limit the load and traffic intensities on agricultural soils in order to avoid permanent topsoil and subsoil compaction, especially, in harvest operations. Compaction is caused by the high traffic intensity of tractors used for crop protection treatments and harvest operations, rather than for actual seeding, in special, when these operations are carried out on wet soil or with high-pressure tyres. Direct drilling systems usually have lower traffic intensities than the conventional tillage systems. Controlled traffic is other possibility to reduce soil compaction been done, however, about the compaction of non-tillage soils in harvest operations. The main objectives of this work were: a) To quantify the changes in the physical properties of a clayey soil, due to traffic in harvest operations. b) To assess corn yield as a response variable related to different traffic alternatives: 1) controlled traffic in harvest operations, 2) conventional traffic intensities in harvest operations. c) To enhance present knowledge on the effects of traffic alternatives in harvest operations on the soil after nine years of direct drilling system cultivation. In the study area, an increase in the yield of corn estimated at 33,7 % on average was observed during three consecutive years of controlled traffic was applied in harvest operations. In spite of the high level of initial soil compaction one can see that all the compared traffic alternatives produced increases in the topsoil cone index and bulk density generating, also, reduction in the total soil porosity. From the economic point of view and after the controlled traffic (15,2 mg km ha<sup>-1</sup>) application, the first year corn yield increases represented US\$ 161,5 ha<sup>-1</sup>. Second year increases represented US\$ 195,5 ha<sup>-1</sup> and third year increases represented US\$ 331 ha<sup>-1</sup>. (Corn costs about US\$ 85 Tn). The saving of fuel was about US\$ 1,35 ha<sup>-1</sup>.

**Keywords:** Traffic intensity, soil compaction, direct drill.

## INTRODUCCION

La degradación estructural del suelo es uno de los principales problemas de las áreas cultivadas del mundo (Håkansson y Reeder, 1994; Soane y Van Ouwerkerk, 1994). Esta degradación puede incluir el sellado de la superficie, el endurecimiento de capas del perfil, la disminución de la estabilidad de agregados y la compactación subsuperficial, habiéndose identificado entre sus principales causas el excesivo laboreo, la remoción de la cobertura superficial y el tráfico de vehículos (Greenland, 1981; Packer *et al.*, 1992). Es sabido que el tráfico vehicular es el principal responsable de la compactación inducida en suelos bajo producción, siendo la textura y su contenido de humedad los aspectos más relevantes en relación a la reducción del espacio poroso (Botta *et al.*, 2002). Alakuku, (1996) determinó que la compactación inducida por el tráfico vehicular persistía entre 3 y 11 años en suelos con porcentajes de arcilla entre el 6 y el 85%, aun con períodos de congelamiento del suelo en profundidad, cuando el mismo fue transitado con altas cargas sobre el eje. El número de veces en que el sustrato es transitado, también es un factor determinante de la compactación inducida. Tanto la densidad aparente como la profundidad y la superficie de suelo compactado aumentan

progresivamente con el número de pasadas (Jorajuría *et al.*, 1997; Botta *et al.*, 2004). El daño subsuperficial es el más peligroso, puesto que involucra a horizontes no labrados anualmente. Cargas de 35 kN por eje que transitaron suelos en condiciones húmedas 14 veces, produjeron deformaciones plásticas del perfil hasta una profundidad de 400 mm, mientras que cargas de 17,5 kN sólo afectaron los primeros centímetros de suelo (Håkansson y Reeder, 1994). Estos autores establecieron que en suelos arcillosos son mayores los riesgos de compactar el subsuelo a niveles que limiten la producción agrícola, como mayor será también la persistencia del daño realizado. En Argentina, la degradación y deterioro de las propiedades físicas y químicas de los suelos, como resultado del uso agrícola, está presente en prácticamente la totalidad de las tierras agrícolas bajo cultivo. Debido a esto, en los últimos años se han adoptado en las principales zonas de cultivo sistemas de labranza conservacionista, entre los cuales se destaca la siembra directa sin labranza previa. Con la aplicación de dicha técnica, se puede producir, según Senigagliesi y Ferrari (1993), reducciones en los valores de macroporosidad y de porosidad total, lo que trae aparejado compactación del suelo. Botta *et al.* (2005) determinaron que la siembra directa produjo una mayor compactación del suelo, prin-

cialmente en el estrato de 0,05 a 0,2 m (hasta 2,1 MPa). A su vez la labranza con reja compacta en orden medio (1,75 MPa) y en el estrato de 0,20 a 0,25 m, mientras que la labranza con cincel no produjo compactación (1,2 MPa). Sin embargo Lal *et al.* (1994) encontraron en un ensayo de 28 años menores valores de densidad aparente de los primeros 0,18 m de suelo en siembra directa, comparado con reja y cincel, lo que fue atribuido a la acción de las lombrices como formadores de canales. Otra técnica prácticamente no utilizada en Argentina, para tratar de disminuir la compactación del suelo, es la de tráfico controlado. Esta técnica adopta el principio de no traficar sobre el suelo cultivado (Chamen 2005). Este concepto no es nuevo, Towards (citado por Soane *et al.*, 1981) al final del siglo XIX, lo utilizó con máquinas e implementos pesados (alrededor de 15 – 20 t) de escasa maniobrabilidad. Halkett (1858) diseñó un sistema con líneas de tráfico permanente, donde todas las labores deberían ser conducidas; el ancho de vía utilizado, en forma preliminar, fue de 9 metros y se extendió a 15 o más metros. Dumas *et al.* (1973) evaluaron, sobre cultivo de algodón, la técnica de tráfico controlado combinado con labranza profunda (subsulado). Ellos encontraron que la labranza profunda junto al tráfico controlado produjo un aumento del 9% en el crecimiento de las plantas de algodón, lo que trajo aparejado la obtención de máximos rendimientos (4722-kg/ha semilla de algodón). Håkansson (1987) realizó ensayos de campo en el norte de Estados Unidos y el sur de Canadá, con el fin de estimar el costo de la compactación causada por el tránsito de una cosechadora de maíz de 12 surcos. La cosechadora, transitando en forma convencional (descarga en cabecera), produjo disminución del rendimiento del cultivo de alrededor de 15% comparado al testigo con tráfico controlado para los carros de granos. Este 15%, expresado en dinero, mostró una pérdida de 110 U\$S/ha. Este ensayo se ubicó en 240 ha de maíz y el tiempo de cosecha se incrementó de 84,5 a 97 h.

Raper *et al.* (1994) comparando varios sistemas de labranza en cultivo de algodón sobre un suelo franco arenoso (Typic Hapludults), incluyendo una labor anual de subsulado a 0,4 y 0,5 m de profundidad, encontraron que solamente se produjeron aumentos significativos en el rendimiento del cultivo de algodón cuando se aplicó la técnica de tráfico controlado sobre los distintos sistemas de labranza.

Los datos sobre investigaciones que comparan los efectos del tráfico controlado en sistemas de siembra directa son muy escasos respecto a los realizados sobre sistemas de labranza convencional. Campbell and Hunter (1986), trabajando en Escocia sobre suelos arcillosos imperfectamente

drenados, muestran que, para bajos pesos sobre el eje circulando en la misma senda, los rendimientos del cultivo sobre sistemas de no labranza fueron reducidos, comparados con los de cero tráfico. Lo anterior coincide con lo expresado por Chamen (2005), quien indica que esto ocurre en el comienzo de la aplicación de la técnica de no labranza, pero dichas diferencias estuvieron ausentes al cuarto año de establecida, a pesar de no producirse reducción de la densidad aparente en las zonas traficadas.

Contrastando esto, Botta *et al.* (2004) trabajando con soja sobre suelos arcillosos encontraron que los rendimientos seguían decreciendo, sobre la zona donde fue aplicado el tráfico, luego de siete años de establecida la técnica de siembra directa. Los objetivos del presente trabajo fueron: a) Cuantificar los cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso debido al tráfico. b) Determinar la respuesta del rendimiento del cultivo de maíz relativo a diferentes alternativas de tráfico: 1) tráfico controlado en operaciones de cosecha, 2) intensidad de tráfico convencional en las operaciones de cosecha. c) Acrecentar el conocimiento presente sobre los efectos de las alternativas de tráfico en las operaciones de cosecha sobre un suelo con nueve años bajo el sistema de siembra directa.

## MATERIALES Y METODOS

### Sitio de estudio

Los ensayos se realizaron en el este de la región pampeana (34° 25' sur y 59° 15' oeste), altitud 22 m sobre el nivel del mar, sobre un suelo Argiudol Típico (Soil Conservation Service, 1994); gradiente 0,5 a 1%, bien drenado, drenaje clase 4, el rango de materia orgánica es de 3,6% en superficie a 1,4% a los 0,6 m de profundidad. La historia previa del lote es de 9 años bajo la técnica de siembra directa. Las propiedades físicas y mecánicas del suelo se pueden ver en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Propiedades físicas y mecánicas del suelo.

| Profundidad (mm)                               | 0 - 150 | 150 - 300 | 300 - 450 | 450 - 600 |
|--|---------|-----------|-----------|-----------|
| <b>Proctor:</b>                                |         |           |           |           |
| Óptimo contenido de agua (% w/w)               | 22,3    | 23,0      | 24,4      | 25,2      |
| Densidad aparente máxima (mg m <sup>-3</sup> ) | 1,49    | 1,53      | 1,68      | 1,71      |
| Carbono Orgánico (kg <sup>-1</sup> )           | 16,5    | 7,00      | 5,10      | 4,3       |
| Nitrógeno total (g kg <sup>-1</sup> )          | 1,80    | 0,90      | 0,70      | 0,8       |
| Relación C/N                                   | 9,10    | 7,70      | 7,20      | 5,4       |
| Arcilla: (<2 u) g kg <sup>-1</sup>             | 22,4    | 26,3      | 35,1      | 34,2      |
| Limo: (2-20 u) g kg <sup>-1</sup>              | 33,8    | 28,7      | 26,4      | 28        |
| Limo: (20-50 u) g kg <sup>-1</sup>             | 73,2    | 67,0      | 62,0      | 61        |
| Arena fina: (100 - 250 u)                      | 0,30    | 0,22      | 0,35      | 0,4       |
| pH   | 5,7     | 5         | 5,8       | 5,5       |
| pH: en H <sub>2</sub> O (1: 2,5)               | 6       | 5,6       | 6,3       | 6,2       |

**Tabla 2:** Contenido de agua (%) del suelo, en cada año al inicio de los tres tratamientos de tráfico.

| Rango de profundidad (mm) | Promedio de tres años | Fecha de tráfico |          |          |
|---------------------------|-----------------------|------------------|----------|----------|
|                           |                       | 23/03/02         | 27/03/03 | 22/03/04 |
| 0 – 50                    |                       | 20 a             | 21,5 a   | 21 a     |
| 50 – 100                  |                       | 21 a             | 22 a     | 22 a     |
| 100 – 150                 |                       | 20 a             | 21 a     | 21,2 a   |
| Promedio (0 – 150 mm)     | 21                    | 20,3 a           | 21,5 a   | 21,4     |
| 150 – 200                 |                       | 20 a             | 21,6 a   | 22,6 a   |
| 250 – 300                 |                       | 20,7 a           | 21,8 a   | 22,4 a   |
| 300 – 350                 |                       | 21,4 a           | 22 a     | 21,9 a   |
| Promedio (150 – 350 mm)   | 21,6                  | 20,7 a           | 21,8 a   | 22,3 a   |
| 350 – 400                 |                       | 21 a             | 22 a     | 22,1 a   |
| 400 – 450                 |                       | 22 a             | 21,5 a   | 21,5 a   |
| Promedio (350 – 450 mm)   | 21,7                  | 21,5 a           | 21,8 a   | 21,8 a   |

Letras diferentes entre cada año (horizontalmente dispuestas) denotan diferencia significativa entre los tratamientos para cada profundidad ( $P < 0,01$  Test de rango múltiple de Duncan).

El contenido de agua al momento del tráfico se puede ver en la Tabla 2. El promedio de contenido de agua en el intervalo de 0 a 150 mm fue de 21%, dicho contenido estuvo 1,3% por debajo de la humedad de máxima compactación determinado por test de compactación Proctor ASTM.D.698.T (1933). Este test indicó que la máxima densidad aparente fue de 1,49 Mg/m<sup>3</sup> con un contenido de agua de 22,3% en el intervalo de 0 – 150 mm de profundidad.

El maíz fue sembrado, el primer año del ensayo, el día 3/10/02, el segundo año el día 1/10/03 y el tercer año el día 4/10/04. La densidad de siembra fue de 80.000 semillas/ha, la profundidad de siembra fue de 25mm, siendo el porcentaje de emergencia de 85% para todos los tratamientos. La cosecha fue realizada, para todos los tratamientos, durante los últimos 10 días de marzo. A lo cosechado se le restaron las pérdidas de la cosecha mecanizada y las naturales, dando como resultado el rendimiento final. Los rendimientos fueron medidos con cuadrantes pequeños.

### Parámetros medidos

Los parámetros medidos fueron: contenido de agua (w/w), densidad aparente (DA), índice de cono (IC) y porosidad de suelo calculada (P); la medición de los mismos fue realizada durante el tráfico en las cosechas: 2002, 2003 y 2004. La capacidad de trabajo (CP) y el consumo de combustible fueron medidos durante las operaciones de cosecha (Cc). Finalmente, el rendimiento del cultivo de maíz (RM) se midió durante las cosechas marzo 2003, 2004 y 2005; se debe destacar que el año tomado como base para el rendimiento de maíz

fue 2002, debido a que en la cosecha de ese año se instalaron los ensayos de tráfico y el impacto del mismo sobre el rendimiento del maíz fue medido en las campañas siguientes.

La densidad aparente, en el rango de 0 a 450mm, fue medida, luego del tráfico, con sonda gamamétrica (Troxler 3440), el intervalo de medición fue de 50 mm. Cada dato de densidad aparente y de contenido de humedad es promedio de 10 mediciones, al mismo tiempo los datos de los dos parámetros fueron verificados por el método del cilindro y gravimétrico, respectivamente. El índice de cono fue determinado con un penetrómetro registrador marca Scout 900 S 313 (ASAE Standards S313, 1998). Cada valor de (IC) es promedio de 25 datos por parcela en el rango de 0 – 450 mm tomados cada 25mm, la DA y el IC. La porosidad fue calculada a partir de la densidad de partícula.

### Diseño experimental

Los tratamientos de tráfico fueron los siguientes:

**Tratamiento 1:** (Intensidad de tráfico 38,45 Mg/km/ha), en este tratamiento la parcela fue traficada, en toda su superficie, con una cosechadora de 152,5 kN de peso total, un tractor FWA de 83,3 kN y un carro tolva para transporte de granos de 200 kN de peso total. Este tratamiento representa el método de cosecha utilizado comúnmente en la región donde se realizó el ensayo y es tomado como tratamiento testigo.

**Tratamiento 2:** (Intensidad de tráfico 20,11 Mg/km/ha), en este tratamiento la parcela fue traficada a lo largo de una senda predefinida, ubicada en el centro de la parcela, común para el trá-

fico de la misma maquinaria utilizada en el tratamiento 1. En este tratamiento el carro tolva transportador de granos fue cargado mientras traficaba el centro de la parcela solamente.

**Tratamiento 3:** (Intensidad de tráfico 15,2 Mg/km/ha), en este tratamiento se utilizó sólo la cosechadora, es decir la única máquina que circuló por la parcela fue la cosechadora, y el carro tolva transportador de granos fue cargado en las cabeceras del lote.

Las diferentes alternativas de tráfico fueron aplicadas desde 2002 a 2005 (tres estaciones de crecimiento), el diseño experimental consistió en un bloqueo completamente aleatorizado con seis re-

peticiones. El tamaño de las parcelas fue de 100 metros de ancho por 100 metros de largo (10.000 m<sup>2</sup>). Las alternativas de tráfico fueron aplicadas, solamente, en las operaciones de cosecha (las características del equipo utilizado se muestran en la Tabla 3). El área de contacto rueda/suelo de cada máquina (tractor, cosechadora y carro de granos) fue medida sobre el suelo de las parcelas introduciéndose las maquinarias, en reversa, y pintando con un aerosol el perímetro de pisada del neumático. Luego, con un elevador hidráulico se levantó la máquina y se introdujo un acrílico sobre el que se dibujó la impronta hecha con pintura. Finalmente se calcó la impronta del acrílico y se midió el área con planímetro.

**Tabla 3:** Características del equipo utilizado en el ensayo.

| Característica del equipo                          | Cosechadora New Holland TR97                     |
|--|--|
| Motor modelo                                       | FORD GENESIS                                     |
| Potencia del motor (CV/kW)                         | 255/187,7 kW                                     |
| Numero de rotores                                  | Two  |
| Neumáticos delanteros                              | 24,5x32R1 10 ply                                 |
| Neumáticos traseros                                | 11.25x24 8 ply                                   |
| Peso total (con carga) (kN)                        | 152,5  |
| Cabezal maicero 8 surcos (m)                       | 9,1  |
| Ancho de vía delantero (mm)                        | 3050   |
| Ancho de vía trasero (mm)                          | 3000   |
| Area de contacto rueda delantera (m <sup>2</sup> ) | 0,5  |
| Area de contacto rueda trasera (m <sup>2</sup> )   | 0,1  |
| Presión sobre el suelo rueda delantera (kPa)       | 106,4  |
| Presión sobre el suelo rueda trasera (kPa)         | 228  |
|  | Tractor FWA SAME Laser 150                       |
| Potencia del motor (CV/kW)                         | 145/106,7  |
| Neumáticos delanteros                              | 16,9 R 30  |
| Neumáticos traseros                                | 24,5 R 32  |
| Peso total (con carga) (kN)                        | 83,30  |
| Peso en el eje delantero (kN)                      | 33,30  |
| Peso en el eje trasero (kN)                        | 50   |
| Ancho de vía delantero (mm)                        | 2000   |
| Ancho de vía trasero (mm)                          | 2200   |
| Area de contacto rueda delantera (m <sup>2</sup> ) | 0,24   |
| Area de contacto rueda trasera (m <sup>2</sup> )   | 0,43   |
| Presión sobre el suelo rueda delantera (kPa)       | 141  |
| Presión sobre el suelo rueda trasera (kPa)         | 114  |
|  | Carro transportador de granos<br>AKRON TAD 20 TN |
| Rodado delantero                                   | 23,1 – 30  |
| Rodado trasero                                     | 23,1 – 30  |
| Peso total (con carga) (kN)                        | 200  |
| Ancho de vía delantero (mm)                        | 3050   |
| Ancho de vía trasero (mm)                          | 3050   |
| Area de contacto rueda delantera (m <sup>2</sup> ) | 0,35   |
| Area de contacto rueda trasera (m <sup>2</sup> )   | 0,35   |
| Presión sobre el suelo rueda delantera (kPa)       | 142  |
| Presión de contacto rueda trasera (kPa)            | 142  |

**Tabla 4:** Temperatura máxima media y precipitaciones totales recibidas en intervalos de 10 días durante los periodos de producción del maíz en Luján, Buenos Aires. (Estación Meteorológica del CIDEPA, Universidad Nacional de Luján).

| Periodo   |         | Precipitaciones (mm) |                      |                      | Temperatura máxima media (°C) |                      |                      |
|-----------|---------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|----------------------|----------------------|
|           |         | Oct./02-<br>Marzo/03 | Oct./03-<br>Marzo/04 | Oct./04-<br>Marzo/05 | Oct./02-<br>Marzo/03          | Oct./03-<br>Marzo/04 | Oct./04-<br>Marzo/05 |
| Octubre   | 1 – 10  | 45                   | 30                   | 28,5                 | 23,5                          | 24,1                 | 25,4                 |
|           | 11 – 20 | 35                   | 22,7                 | 15                   | 22,3                          | 25,3                 | 26,1                 |
|           | 21 – 30 | 30                   | 14                   | 14                   | 24,7                          | 23,5                 | 24                   |
| Noviembre | 1 – 10  | 36,5                 | 50                   | 32                   | 25,2                          | 25,8                 | 23,7                 |
|           | 11 – 20 | 25                   | 90,5                 | 40                   | 27,1                          | 26,5                 | 24,5                 |
|           | 21 – 30 | 25                   | 53                   | 34                   | 25,2                          | 25,3                 | 23,1                 |
| Diciembre | 1 – 10  | 66                   | 65                   | 55,2                 | 25,8                          | 26                   | 27                   |
|           | 11 – 20 | 54                   | 17                   | 80                   | 24                            | 26,5                 | 27,6                 |
|           | 21 – 31 | 18,5                 | 15,7                 | 23,3                 | 26,2                          | 26                   | 28                   |
| Enero     | 1 – 10  | -                    | 2                    | -                    | 31,3                          | 31,2                 | 33,4                 |
|           | 11 – 20 | 19                   | 47,5                 | 25                   | 31,1                          | 31                   | 31                   |
|           | 21 – 31 | 37,8                 | 97                   | 95                   | 32                            | 31,7                 | 32,3                 |
| Febrero   | 1 – 10  | 18,3                 | 21                   | 82                   | 25                            | 28,4                 | 27,3                 |
|           | 11 – 20 | 65,7                 | 24                   | 26                   | 26,8                          | 28                   | 28,5                 |
|           | 21 – 28 | 29                   | 20                   | 23                   | 27                            | 28,7                 | 28                   |
| Marzo     | 1 – 10  | 14                   | 10                   | 30                   | 27,3                          | 28                   | 27,1                 |
|           | 11 – 20 | 2,5                  | 4                    | 6                    | 23,4                          | 24,7                 | 26,2                 |
|           | 21 – 31 | 30                   | 28                   | 35                   | 23,8                          | 23,7                 | 25,6                 |

### Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos obtenidos fue realizado utilizando el programa Statgraf 7.1, realizándose un análisis de varianza (ANOVA) y comparando las medias con el test de rango múltiple de Duncan's ( $P < 0,01$ ). Se debe destacar que el impacto del tráfico sobre el suelo fue medido durante la cosecha de los años 2002, 2003 y 2004, mientras que el efecto sobre el rendimiento del cultivo fue medido durante las cosechas de 2003, 2004 y 2005, siendo tomado como control el rendimiento del maíz del año 2002, éste fue de 8,0 t ha<sup>-1</sup>.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Índice de cono y Densidad aparente

La temperatura máxima media y precipitaciones totales recibidas en intervalos de 10 días durante los periodos de producción del maíz entre el 1 de octubre y el 31 de marzo de cada año se muestran en la Tabla 4. Para las tres estaciones de cultivo la temperatura máxima media fue moderada en octubre, noviembre, febrero y marzo, pero excedió los 31° C en enero, las precipitaciones recibidas en el mes de octubre fueron las adecuadas para la emergencia del maíz. Las precipitaciones fueron significativamente altas en el momento antes de la cosecha (para los tres años en los últimos 10 días de marzo), debido a esto el contenido de agua del suelo al momento del tráfico de cosecha fue elevado (Tabla 2). Finalmente, las condiciones climáticas durante los meses de producción del maíz fue-

ron bastante similares en los años que duró el ensayo, entonces se puede inferir que las variaciones producidas en el rendimiento del maíz se deben a la compactación del suelo producida por las alternativas de tráfico aplicadas.

Las mediciones del índice de cono (IC) y de la densidad aparente (DA) fueron realizadas inmediatamente luego de la cosecha del maíz. Es importante destacar que no hubo diferencias significativas ( $P < 0,01$ ), en el contenido de agua del suelo (Tabla 2), donde se realizaron las mediciones de índice de cono, por lo tanto todas las modificaciones que sucedieron en dicho parámetro se puede interpretar que son debido al tráfico del equipo durante las operaciones de cosecha.

Los valores medidos de dichos parámetros (IC y DA) muestran que la compactación producida por el tráfico de la maquinaria durante la cosecha de maíz causa considerables cambios en las propiedades del suelo, tanto a nivel superficial como subsuperficial (Tabla 3 y Figura 1).

Estos resultados coinciden con los obtenidos por Håkansson *et al.*, (1988), los autores indican que la compactación producida por altos pesos por eje está relacionada al tipo de suelo, a la intensidad de tráfico y al número de años desde que se originó la compactación.

La Tabla 5 muestra que el IC, a nivel superficial, para todos los tratamientos, fue mayor a los 1.300 kPa citados por Botta *et al.* (2006) como críticos para la normal emergencia de la semilla de trigo en suelos de textura fina. Entre los 300 y los 450 mm de profundidad los valores de IC

fueron mayores a los 1.500 kPa (en los tres años), estos valores fueron citados por Jorajuría *et al.* (1997) como restrictivos para el crecimiento de la raíz.

Hasta aquí, los resultados del IC muestran a este parámetro como muy sensible a los efectos del tráfico, mientras que el contenido de agua del suelo no parece tener relación con el mismo. Una hipótesis con la que se explicaría lo anterior es que podría deberse, coincidiendo con Mapa *et al.* (1986), a los cambios en la distribución del tamaño de los poros del suelo, que son producidos cuando el mismo es compactado por el tráfico de la maquinaria. El tráfico origina poros interagregados que forman fases no acomodadas de suelo, teniendo efecto sobre el contenido de agua y las propiedades físicas del mismo.

Las tendencias, en el parámetro DA son parecidas a las del IC, los cambios en la DA son mayores en la superficie (0–200mm) que en el subsuelo. Para todos los tratamientos, los valores de DA son superiores a los 1,2 Mgm<sup>-3</sup> recomendados por Ressia *et al.* (1998), como para evitar disminución en el rendimiento del cultivo. Siguiendo con este parámetro y hasta los 450 mm de profundidad, los valores medidos de DA fueron también altos (Figura 1).

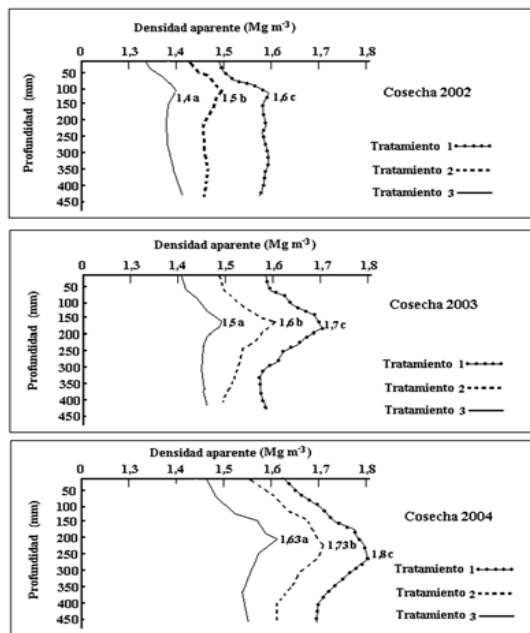


Figura 1: Distribución de la densidad aparente del suelo y valores picos obtenidos bajo los diferentes tratamientos de tráfico durante las cosechas (2002, 2003 y 2004).

Los altos valores de IC y DA indican sobrecompactación, ésta podría ser el resultado de la combinación entre el tráfico agrícola, el contenido

Tabla 5: Índice de cono (kPa) para cada año y para los tres tratamientos de tráfico (resaltado, en negrita, se pueden ver los valores picos de IC para cada tratamiento y año).

| Prof. (mm) | Cosecha<br>23/03/2002 |               |               | Cosecha<br>27/03/2003 |               |               | Cosecha<br>22/03/2004 |               |               |
|------------|-----------------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|-----------------------|---------------|---------------|
|            | T1                    | T2            | T3            | T1                    | T2            | T3            | T1                    | T2            | T3            |
| 0          | 2480 c                | 1598 b        | 1425 a        | 2650 c                | 1989 b        | 1521 a        | 2923 c                | 2201 b        | 1700 a        |
| 25         | 2500 c                | 1800 b        | 1445 a        | 2860 c                | 2000 b        | 1590 a        | 3000 c                | 2290 b        | 1789 a        |
| 50         | 2568 c                | 2020 b        | 1500 a        | 2990 c                | 2201 b        | 1610 a        | 3100 c                | 2345 b        | 1980 a        |
| 75         | 2880 c                | 2201 b        | 1729 a        | 3100 c                | 2410 b        | 1769 a        | 3245 c                | 2456 b        | 2000 a        |
| 100        | 3126 c                | 2560 b        | 1945 a        | 3290 c                | 2500 b        | 1980 a        | 3333 c                | 2500 b        | 2010 a        |
| 125        | <b>3350 c</b>         | <b>2980 b</b> | <b>2001 a</b> | 3488 c                | 2680 b        | 2020 a        | 3435 c                | 2545 b        | 2013 a        |
| 150        | 3000 c                | 2405 b        | 1850 a        | <b>3630 c</b>         | <b>3010 b</b> | <b>2118 a</b> | 3569 c                | 2789 b        | 2020 a        |
| 175        | 2890 c                | 2368 b        | 1800 a        | 3100 c                | 2680 b        | 2020 a        | 3789 c                | 2930 b        | 2022 a        |
| 200        | 2700 c                | 2250 b        | 1750 a        | 3000 c                | 2500 b        | 1880 a        | <b>3910 c</b>         | 3102 b        | 2133 a        |
| 225        | 2501 c                | 2259 b        | 1753 a        | 2890 c                | 2250 b        | 1700 a        | 3780 c                | <b>3301 b</b> | 2189 a        |
| 250        | 2497 c                | 2290 b        | 1756 a        | 2652 c                | 2200 b        | 1650 a        | 3650 c                | 3001 b        | <b>2400 a</b> |
| 275        | 2437 c                | 2180 b        | 1685 a        | 2550 c                | 2350 b        | 1675 a        | 3600 c                | 2956 b        | 2201 a        |
| 300        | 2426 c                | 2120 b        | 1589 a        | 2500 c                | 2300 b        | 1701 a        | 3500 c                | 2750 b        | 2220 a        |
| 325        | 2397 c                | 2230 b        | 1667 a        | 2559 c                | 2290 b        | 1725 a        | 3380 c                | 2766 b        | 2223 a        |
| 350        | 2380 b                | 2300 b        | 1700 a        | 2589 c                | 2280 b        | 1745 a        | 3190 c                | 2790 b        | 2256 a        |
| 375        | 2376 b                | 2310 b        | 1729 a        | 2601 c                | 2268 b        | 1820 a        | 3000 c                | 2820 b        | 2260 a        |
| 400        | 2364 b                | 2312 b        | 1734 a        | 2632 c                | 2290 b        | 1895 a        | 3201 c                | 2870 b        | 2265 a        |
| 425        | 2378 b                | 2321 b        | 1748 a        | 2640 c                | 2470 b        | 1935 a        | 3290 c                | 2990 b        | 2271 a        |
| 450        | 2387 b                | 2325 b        | 1769 a        | 2648 b                | 2570 b        | 2180 a        | 3490 c                | 3020 b        | 2281 a        |

Valores con letras diferentes dentro de cada año (horizontalmente dispuestas) denotan diferencia significativa entre tratamientos para cada profundidad (P <0,01 Test de rango múltiple de Duncan).

de agua al momento de realizar la cosecha y el alto número de años de instalada la técnica de siembra directa. La Tabla 5 y la Figura 1 muestran que los valores picos del IC y DA, para los tres años de medición, dieron diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0,01$ ) entre los tratamientos, además estos valores picos, de ambos parámetros, superan a los citados como críticos para afectar el crecimiento de la raíz.

El resultado del test de compactación Proctor (1933), para el rango entre 0–150mm de profundidad, arrojó una densidad aparente máxima de  $1,49 \text{ Mg m}^{-3}$  con un contenido de agua de 22,3%. Los tratamientos de tráfico fueron realizados a un contenido de agua cercano al valor máximo Proctor, a un nivel de 1,3% por debajo de éste. Este valor Proctor indica la importancia de la compactación producida por los tratamientos de tráfico, considerando que la condición inicial del suelo, en el primer año del ensayo, promedió  $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$  en el rango de 0 a 150 mm, este valor fue 97,9% del máximo Proctor.

### Porosidad del suelo

La porosidad total del suelo es tomada como un buen indicador del estado de compactación del mismo. Este parámetro presentó (Tabla 6) un valor máximo promedio de 42,7% en el tratamiento 3 y un mínimo valor promedio de 35,8 a 39,2% para los tratamientos 1 y 2, respectivamente. Para ningún tratamiento se encontraron valores inferiores a 30%, considerados críticos para el normal crecimiento de las raíces, sin embargo el alto contenido de agua del suelo al momento del tráfico junto a la elevada presión superficial pudieron haber causado un decrecimiento en los macroporos del suelo y en consecuencia se vio afectada la respuesta del cultivo. Las diferencias entre los tratamientos, a nivel superficial, fueron estadísticamente significativas ( $P < 0,01$ ). En el rango de 0–150 mm de profundidad, el tratamiento 1 causó una reducción mayor que los tratamientos 2 y 3 (Tabla 5). A pesar del alto nivel de compactación inicial que poseía el suelo, se puede ver que todas las alternativas de tráfico comparadas produjeron compactación elevada en el nivel superficial del suelo y generaron malas condiciones físicas de suelo para que la semilla pueda emerger y crecer.

Estos resultados corroboran los encontrados por Botta *et al.* (2002), quienes indican que la presión en el área de contacto rueda/suelo es la responsable de la compactación superficial del mismo, pudiéndose ver, en la Tabla 2, que los equipos utilizados en la cosecha de maíz supe-

**Tabla 6:** Valores de porosidad de suelo (%) medidos en tres años (años 2002, 2003 y 2004) luego de la aplicación de los tratamientos de tráfico (0–150 mm de profundidad).

| Porosidad (%) | Tratamientos comparados |                     |                    |
|---------------|-------------------------|---------------------|--------------------|
|               | T1 (38,45 Mg/km/ha)     | T2 (20,11 Mg/km/ha) | T3 (15,2 Mg/km/ha) |
| Año 2002      | 39,6 a                  | 43,4 b              | 47,1 c             |
| Año 2003      | 35,8 a                  | 39,6 b              | 43,4 c             |
| Año 2004      | 32,0 a                  | 34,7 b              | 37,7c              |

Diferentes letras dentro de cada año (horizontalmente dispuestas) indican diferencias significativas para los diversos tratamientos de tráfico ( $P < 0,01$  Test de rango múltiple de Duncan).

ran los 100 kPa en la presión en el área de contacto rueda/suelo. Finalmente, la influencia de la porosidad superficial sobre el rendimiento final del cultivo es muy alta, ya que es en la parte superficial del suelo donde se produce el crecimiento principal de la raíz y la captación de nutrientes.

### Capacidad de trabajo efectiva, consumo de combustible y rendimiento de maíz

La capacidad de trabajo efectiva de una cosechadora es función del ancho del cabezal, de la velocidad de avance y de las pérdidas de tiempo durante el trabajo en el campo. Los resultados obtenidos en el ensayo se muestran en la Tabla 7.

La capacidad de trabajo efectiva fue diferente según los tratamientos de tráfico aplicados, el tratamiento 1 arrojó diferencias estadísticamente significativas ( $P < 0,01$ ) respecto a los tratamientos 2 y 3. El tratamiento 3 fue el de menor capacidad de trabajo, esto se debió, probablemente, a los incrementos en las pérdidas de tiempo por producir la descarga de la cosechadora solamente en las cabeceras del lote, sin embargo, este tratamiento de tráfico fue el que produjo, por su menor intensidad, el mayor rendimiento del cultivo de maíz.

**Tabla 7:** Capacidad de trabajo efectiva (ha/h) y consumo de combustible (L/ha) para los tres tratamientos.

| Tratamientos de tráfico | Capacidad de trabajo efectiva (ha/h) | Consumo de combustible L/ha |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|
| T1 (38,45 Mg/km/ha)     | 5,91 a                               | 7,6 a                       |
| T2 (20,11 Mg/km/ha)     | 5,36 b                               | 5,5 b                       |
| T3 (15,2 Mg/km/ha)      | 5,09 b                               | 4,9 b                       |

Diferentes letras entre cada tratamiento (verticalmente dispuestas) indican diferencias significativas para los diversos tratamientos de tráfico ( $P < 0,01$  Test de rango múltiple de Duncan).



En cuanto al consumo de combustible, los tratamientos 2 y 3 fueron los que presentaron menor consumo por hectárea, esta diferencia fue solamente significativa para el tratamiento 1. El consumo de combustible y la capacidad de trabajo efectiva se redujo con el empleo de las alternativas de tráfico debido al menor movimiento de las máquinas y a su uso más eficiente.

Los rendimientos de maíz, para cada tratamiento, durante el periodo 2003 - 2005 se presentan en la Tabla 8. Los rendimientos se redujeron con el incremento de los niveles de compactación, en los tres años de ensayo, para el tratamiento de mayor intensidad de tráfico T1 38,45 Mg/km/ha.

El efecto de la intensidad de tráfico sobre el rendimiento del maíz fue muy importante, los rendimientos decrecen a medida que la intensidad de tráfico se incrementa, no encontrándose diferencias significativas ( $P < 0,01$ ), en cuanto al rendimiento, entre los tratamientos T2 20,11 Mg km ha<sup>-1</sup> y T3 15,2 Mg km ha<sup>-1</sup>.

Coincidiendo con Riley *et al.* (1994), gran parte de la reducción del rendimiento producida por el tratamiento 1 se podría deber a daños ocasionados por la alta intensidad de tráfico sobre la estructura del suelo en la parte superficial del mismo. Esta conclusión es sostenida por el hecho de que gran parte del éxito en el rendimiento del maíz está regido por la baja compactación superficial del suelo, cosa que no sucede luego que el mismo es transitado con la intensidad de 38,45 Mg/km/ha correspondiente al tratamiento 1.

Teniendo en cuenta a 2002 como el año base (el rendimiento de maíz fue de 8,0 t ha<sup>-1</sup>), para el tratamiento 3, el porcentaje de incremento

**Tabla 8:** Rendimientos de maíz para los diferentes tratamientos de tráfico en tres estaciones de crecimiento (2003, 2004 y 2005).

|  | Tratamientos comparados |                     |                    |
|--|-------------------------|---------------------|--------------------|
|  | T1 (38,45 Mg/km/ha)     | T2 (20,11 Mg/km/ha) | T3 (15,2 Mg/km/ha) |
| Rendimiento de maíz<br>(t ha <sup>-1</sup> )<br>(2003) | 7,9 a                   | 9,1 b               | 9,9 b              |
| Rendimiento de maíz<br>(t ha <sup>-1</sup> )<br>(2004) | 7,7 a                   | 9,3 b               | 10,3 b             |
| Rendimiento de maíz<br>(t ha <sup>-1</sup> )<br>(2005) | 7,6 a                   | 9,9 b               | 11,9 b             |

Diferentes letras dentro de cada año (horizontalmente dispuestas) indican diferencias significativas para los diversos tratamientos de tráfico ( $P < 0,01$  Test de rango múltiple de Duncan).

del rendimiento fue de 23,7, 28,7 y 48,7 %, respectivamente, para los años 2003, 2004 y 2005. En los tres años de medición, el traficar el suelo con 38,45 Mg/km/ha produjo menores rendimientos que el año 2002 decreciendo en el orden de 1,25, 3,75 y 5,0%.

Desde el punto de vista económico y después de aplicar una intensidad de tráfico de 15,2 Mg/km/ha<sup>-1</sup>, el primer año de incremento en el rendimiento de maíz representó US\$ 161.5 ha<sup>-1</sup>, el segundo año representó US\$ 195,5 ha<sup>-1</sup> y el tercero US\$ 331 ha<sup>-1</sup> (el precio del maíz es alrededor de US\$ 85 t). El ahorro de combustible fue de alrededor de US\$ 1,35 ha<sup>-1</sup>.

## CONCLUSIONES

El cultivo de maíz fue afectado por la compactación del suelo producida por el tráfico, así como el rendimiento del cultivo fue decreciendo año tras año, los valores de índice de cono y de densidad aparente se fueron incrementando.

Los altos valores de índice de cono y de densidad aparente causados por la combinación de altos pesos por eje y alta humedad al momento del tráfico afectaron la respuesta del cultivo.

En el área de estudio, luego de aplicar durante tres años tráfico controlado en las operaciones de cosecha, el rendimiento promedio del cultivo de maíz aumentó 33,7% comparado al método convencional.

En suelos bajo siembra directa continua, las operaciones de cosecha deberían realizarse, si es posible, bajo la técnica de tráfico controlado.

## REFERENCIAS

- ALAKUKU, 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 Till Res* 37: 211-222.
- ASAE STANDARDS 1998. ASAE S313.2 Soil Cone Penetrometer. St. Joseph. Michigan, USA.
- BOTTA, G., D. JORAJURIA, L. DRAGHI. 2002. Influence of the axle load, tire size and configuration, on the compaction of a freshly tilled clayey soil. *J Terramech* 39: 47-54.
- BOTTA, G., D. JORAJURIA, R. BALBUENA, H. ROSATTO. 2004. Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: effect on soybean (*Glycine max* L.) yields soil. *Soil Till Res* 78: 53-58.
- BOTTA, G., J. RESSIA, H. ROSATTO, M. TOURN, E. SOZA, C. FERRERO, S. STADLER. 2005. Efectos de la labranza vertical sobre el suelo y el rendimiento del cultivo de girasol (*Helianthus annuus* L.). *Agro-Ciencia* 21: 5-12.

- BOTTA, G., D. JORAJURIA, H. ROSATTO, C. FERRERO. 2006. Light tractor traffic frequency on soil compaction in the Rolling Pampa region of Argentina. *Soil Till Res* 86: 9-14.
- CAMPBELL, D., R. HUNTER. 1986. Drop-cone penetration *in situ* and on minimally disturbed soil cores. *J Soil Sci* 37:153-163.
- CHAMEN, W.C.T. 2005. Controlled traffic farming – its benefits and realization. En: D. Jorajuria, (eds.) *Reología del suelo agrícola bajo tráfico – Modificaciones físico-mecánicas del suelo vinculadas a la compactación debida al tráfico agrario*. p. 107-130. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- DUMAS, W., C. TROUSE, C. SMITH, L. KUMMER, W. GIL. 1973. Development and evaluation of tillage and other cultural practices in a controlled traffic system for cotton in the southern coastal Plains. *Trans. ASAE* 16: 872-876.
- GREENLAND, D. J. 1981. Soil management and degradation. *J Soil Sci* 32: 301-322.
- HÅKANSSON, I. 1987. Long term effects of modern technology on productivity of arable land. *K. Skogs-o. Lantbr. Akad. Tidskr.* 126: 35-40.
- HÅKANSSON, I., W. VOORHES, H. RILES. 1988. Vehicle and wheel tractors influencing soil compaction and crops response in different traffic regimes. *Soil Till Res* 11: 239-282.
- HÅKANSSON, I., J. REEDER. 1994. Subsoil compaction by vehicles with axle load-extend, persistence and crop response. *Soil Till Res* 29: 277 - 304.
- HALKETT, P. 1858. On guideway agriculture: Being a system enabling all the operations of the farm to be performed by steam power. *J Soc Arts, London*, 7: 41-53.
- JORAJURIA, D., L. DRAGHI, A. ARAGON. 1997. The effect of vehicle weight on the distribution of compaction with depth and the yield of *Lolium/Trifolium grassland*. *Soil Till Res* 41: 1-12.
- LAL, R., A. MAHBOUBI, N. FAUSEY. 1994. Long-term tillage and rotation effects on properties of a Central Ohio soil. *Soil Sci Soc Am J* 58: 517-522.
- MAPA, B., R. GREEN, L. SANTO. 1986. Temporal variability of soil hydraulic properties with wetting and drying subsequent to tillage. *Soil Sci Soc Am J* 50: 1133-1138.
- PACKER, I. J., G. J. HAMILTON, T. KOEN. 1992. Runoff, soil loss and soil physical property changes of light textured soils from long term tillage treatments. *Am J Soil Res* 30: 789-806.
- PROCTOR, R. 1933. *Fundamental principles of soil compaction*, Eng News Record, New York, USA.
- RAPER, L., D. REEVES, E. BURT, H. TORBERT. 1994. Conservation tillage and traffic effects on soil condition. *Trans ASAE* 37: 763-768.
- RESSIA, J.M., G. MENDIVIL, R.H. BALBUENA, O. CHIDICHIMO. 1998. Desarrollo radicular y rendimiento de maíz en función de la labranza. En: R. Balbuena y S. Benez (eds.) *Ingeniería rural y mecanización agraria en el ámbito Latinoamericano*. p. 98-104. Universidad Nacional de La Plata. La Plata, Buenos Aires, Argentina.
- RILEY, H., T. BØRRESEN, E. EKEBERG, T. RYDBERG. 1994. Trends in reduced tillage research and practice in Scandinavia. In: M.R. Carter (ed.) *Conservation Tillage in Temperate Agro ecosystems*. p. 23-45. Lewis publishers. Boca Raton, Florida, USA.
- SENIGAGLESI, C., M. FERRARI. 1993. Soil and crop responses to alternative tillage practices. *Crop Sci* 33: 27-35.
- SOANE, B. D., J. DICKSON, D. CAMPBELL. 1981. Compaction by agricultural vehicles: a review. III. Incidence and control of compaction in crop production. *Soil Till. Res* 2: 3-36.
- SOANE, B.D., C. VAN OUWERKERK. 1994. Compaction problems in world agriculture. In: B. D. Soane and Van Ouwerkerk (eds) p. 1-21. *Soil compaction in crop production*. Elsevier Sci Publ. Amsterdam, Holland.
- SOIL CONSERVATION SERVICE. 1994. *Keys to Soil Taxonomy* (6th. Ed). Soil Survey Staff, USDA, Washington DC, USA.