



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

MAESTRIA Y DOCTORADO EN CIENCIAS AGROPECUARIAS
Y RECURSOS NATURALES

**TRANSITO Y EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DE LOS TRACTORES
AGRÍCOLAS EN EL CULTIVO DE MAÍZ**

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

P R E S E N T A

ENRIQUE GARCÍA RODRÍGUEZ

COMITÉ TUTORIAL

Ph.D. FRANCISCO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ

Dr. RODOLFO SERATO CUEVAS

Dr. ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 2020.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



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

**TRANSITO Y EFECTO DE LA COMPACTACIÓN DE LOS TRACTORES
AGRÍCOLAS EN EL CULTIVO DE MAÍZ**

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

**P R E S E N T A
ENRIQUE GARCÍA RODRÍGUEZ**

COMITÉ TUTORIAL

**Ph.D. FRANCISCO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ
Dr. RODOLFO SERATO CUEVAS
Dr. ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA**

El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, Estado de México, 2020.

RESUMEN

En la república mexicana se han realizado pocos estudios sobre los fenómenos que trae como consecuencia la compactación de los suelos y el impacto que sobre el suelo ocasiona el rodado de tractores y máquinas agrícolas y de forma particular en suelos vertisoles, los cuales son difíciles de trabajar, por la formación de estos.

Según Hamza y Anderson (2005), casi todos los neumáticos de los tractores agrícolas aumentan significativamente la compactación del suelo en la huella donde ha circulado. Y con ello la intensidad del tráfico desempeña un papel importante en la compactación del suelo con deformaciones que pueden aumentar con el número de pasadas, lo cual también es corroborado por Botta *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2006. Para conocer la intensidad del tráfico de los tractores y las máquinas agrícolas en diferentes tecnologías de preparación de suelos, algunos investigadores europeos (Hakansson, 2005) han dotado a los tractores de un receptor de señal GPS con el cual se pueda medir la intensidad y el impacto que causan los sistemas de rodajes sobre el suelo y la manera de racionalizar la intensidad de pasadas por el campo, de acuerdo con sus tecnologías de cultivo.

En base a los antecedentes antes planteados, se ha decidido realizar este ensayo en suelo vertisol del Valle de Toluca, con la finalidad de evaluar la intensidad de tráfico de los tractores con SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL (GPS) y el efecto de la compactación en las diferentes tecnologías de preparación de suelos para el cultivo de maíz.

Palabras claves: cinemática del conjunto máquina-tractor, métodos de labranza, GPS.

SUMMARY

In the Mexican Republic, few studies have been carried out on the phenomena that result in soil compaction and the impact on the soil caused by the traction of agricultural tractors and machines and in particular in vertisol soils, which are difficult to work on. , for the formation of these.

According to Hamza and Anderson (2005), almost all agricultural tractor tires significantly increase soil compaction in the footprint where it has circulated. And with that, traffic intensity plays an important role in soil compaction with deformations that can increase with the number of passes, which is also corroborated by Botta et al., 2004; Zhang et al., 2006. To know the intensity of tractor and agricultural machine traffic in different soil preparation technologies, some European researchers (Hakansson, 2005) have equipped tractors with a GPS signal receiver with which You can measure the intensity and impact caused by taxi systems on the ground and how to rationalize the intensity of passes through the field, according to their cultivation technologies.

Based on the background presented above, it has been decided to perform this test on vertisol soil of the Toluca Valley, in order to assess the intensity of tractor traffic with GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS) and the effect of compaction on different technologies of soil preparation for the cultivation of corn.

Keywords: kinematics of the machine-tractor set, tillage methods, GPS.

INTRODUCCIÓN GENERAL

La relación de los humanos con la naturaleza y el suelo se origina desde su aparición como especie, durante miles de años, el impacto que podían causar al suelo era mínimo, pues se trataba de comunidades que se dedicaban a la caza, la pesca y la recolección para su alimentación, que cuando escaseaban o se

agotaban se trasladaban a otros lugares, dando oportunidad con ello a la recuperación de los recursos naturales que habían consumido o afectado.

Con el descubrimiento de la agricultura y la ganadería para alimentarse, los grupos humanos dejan de ser nómadas y pasan al sedentarismo, condiciones de producción y de vida que implican impactos en el medio ambiente más profundos y permanentes, por lo que transforman y especializan las áreas naturales en áreas de cultivo, pastoreo y de vivienda, lo que implica la transformación del uso del suelo.

El estudio de las técnicas agrícolas antiguas, permiten afirmar que ya se tenía comprensión de los fenómenos de la pérdida de fertilidad de los suelos y de los riesgos de la erosión eólica e hídrica. La rotación de cultivos y la combinación de especies (policultivo) es una práctica antigua, al igual que las terrazas y el descanso de la tierra. En el caso de Mesoamérica, crece el consenso de que las afectaciones eran muchos menores en el medio ambiente en las culturas originarias, que las técnicas que trajeron los conquistadores, con el arado, el manejo de los suelos y la ganadería extensiva, que modificaron la vegetación de grandes superficies. Aunado a esta forma de vida, se incluye la minería, que era más demandante de combustibles y madera, lo que generó una gran deforestación de los bosques cercanos a los asentamientos humanos.

Sin embargo, las mayores afectaciones en los recursos naturales, y en específico de los suelos, se ha realizado a partir del siglo XX, como consecuencia del modelo económico de urbanización e industrialización. Esto implica que se extiendan las áreas agrícolas y ganaderas, a costa de grandes superficies de bosques y selvas, que pasan de ser vegetación natural a extensiones de cultivo o pastoreo, condiciones que permiten que el suelo quede expuesto a los efectos del viento y el agua. Además, este desplazamiento de vegetación disminuye la cantidad de materia orgánica, fundamental para que el suelo cumpla sus funciones en los ciclos del agua, carbono y nitrógeno, se mantenga la biodiversidad y fertilidad a los suelos, la cual es sustituida por fertilizantes sintéticos (cuya elaboración implica grandes

consumos de combustibles fósiles), la aplicación de plaguicidas químicos, que contribuyen a la contaminación del suelo, agua, aire y medio ambiente, y el uso continuo de maquinaria agrícola al afecta las condiciones de los suelos, que puede compactar o facilitar los procesos de erosión, al mismo tiempo que elevan los costos de producción.

Por su parte, la ganadería también impacta en los suelos, que además de apacentar en los potreros, es introducido en bosques, selvas y matorrales, indiscriminadamente, afectando la vegetación y los suelos por el sobrepastoreo, y propicia la compactación, siendo afectada la capacidad reproductiva de los pastos, afectando el suelo, el agua y el aire con los gases de tipo invernadero que emite el ganado con sus desechos.

En cuanto al crecimiento urbano y de infraestructura, los asentamientos se dan en las tierras más productivas, cubiertas por pavimentos y concreto, con lo que se pierden la capacidad reproductiva. Así mismo, con la industria, se amplían las actividades nocivas para los suelos, con la extracción de minerales e hidrocarburos, que aparte de destruir los suelos, la remoción de materiales del subsuelo y los desechos acumulados (saques) contaminan el agua, superficial y subterránea, el aire y la biodiversidad. (Semarnat-CP, 2003).

II. LA TIERRA

2.1.- Degradación de la Tierra

La degradación de la tierra abarca un aspecto muy amplio, cubre todos los cambios negativos en la capacidad del ecosistema para prestar bienes y servicios, biológicos, acuícolas, sociales y económicos, y la desertificación se define como el cambio irreversible de la tierra a tal estado que ya no puede ser recuperado a su uso originario.

Por el contrario, la prevención implica el uso de medidas de conservación que mantienen los recursos naturales y su medio ambiente productivos, así como la mitigación, que es la intervención pretendida para reducir la degradación en curso, y la rehabilitación se hace necesaria cuando la tierra ya está degradada hasta tal punto que su uso original ya no es posible y se ha convertido prácticamente en improductiva. En consecuencia, se necesitan inversiones de largo plazo y más costosas para poder obtener algún impacto. (FAO, 2017).

Al mismo tiempo, la FAO (2019) en su evaluación de la “tierra”, la designa como un concepto integrado y multidisciplinario, considerando los factores agrícolas, sociales, económicos y ecosistemas como el recurso agua y clima. Así, el término más ampliamente aceptado de “tierra” es “un área definible de la superficie terrestre que abarca todos los atributos de la biosfera inmediatamente por arriba y por debajo de esa superficie, incluyendo aquellos atributos climáticos cercanos a la superficie, el suelo y las formas del terreno, la superficie hidrológica (incluyendo lagos, ríos, humedales y pantanos), el agua subterránea asociada y las reservas geohidrológicas, las poblaciones de animales y vegetales y los resultados físicos de la actividad humana pasada y presente como terrazas, estructuras hidráulicas, caminos, etc.” (Fao/Unep, 1997).

Cambiar uno de los factores, como el uso de la tierra, tiene impactos potenciales en otros factores, como la flora y la fauna, los suelos, la distribución del agua superficial y el clima. Los cambios en estos factores pueden explicarse fácilmente por la dinámica de los ecosistemas y la importancia de sus relaciones en la planificación y gestión de los recursos de la tierra se ha hecho cada vez más evidente.

La degradación de la tierra constituye un término compuesto, que describe como uno o más de los recursos de la tierra ha estado sometido a un deterioro progresivo, definida generalmente como una “reducción temporal o permanente en la capacidad de producción de la tierra” (Fao, 2017). El cambio

ocurrido por la degradación puede prevalecer por poco tiempo, con el recurso degradado recuperándose rápidamente, o puede ser de largo plazo, causando un cambio permanente, así, la degradación pone en evidencia la fragilidad de los ecosistemas.

Esta degradación, causada por las actividades humanas (antrópicas) ha sido uno de los principales problemas ambientales del siglo XX en todos los países y mantiene un lugar importante de atención en la agenda internacional del siglo XXI. La importancia de este tema resulta de sus consecuencias directas sobre la seguridad alimentaria, la pobreza, la migración y la calidad del ambiente. La degradación de la tierra también constituye un proceso socialmente construido donde las políticas públicas, los mercados, la tenencia de la tierra y donde los sistemas de producción han jugado en doble sentido. Por un lado, han funcionado como incentivo hacia la degradación, promoviendo un uso más intenso y menos sustentable de los recursos; y por el otro, han promovido la productividad, enmascarado procesos de degradación mediante el uso de tecnologías (fertilizantes, maquinaria, agroquímicos, sistemas de riego, entre otros) dando como resultado un temporal y precario sentido de seguridad productiva. En este sentido, la degradación antrópica de las tierras constituye un proceso biofísico acelerado y promovido por causas y necesidades socioeconómicas y políticas.

Las causas de la degradación de la tierra son múltiples, pero la gran mayoría se originan del mal manejo que se les han dado, la explotación inadecuada, como las prácticas agrícolas poco sustentables, el sobrepastoreo y la deforestación. También se aduce que la tenencia de la tierra juega un papel importante, pues existen pocos o ningún tipo de incentivo para invertir en el manejo sustentable de la tierra y se suele utilizar para la satisfacción de necesidades en el corto plazo. La pobreza también es reconocida como un motor que desencadena la degradación de la tierra, así como la inseguridad alimentaria, el acceso restringido a los mercados, la sobrepoblación y factores biofísicos, como los huracanes y la actividad

tectónica. En su conjunto, uno de los factores más importantes para la degradación de la tierra, es el contexto sociopolítico y económico del uso de la tierra. (International Water Management Institute, 2007).

2.2.- El suelo

De acuerdo con la FAO (2015), el suelo es la capa delgada de material que se encuentra en la superficie de la Tierra. Es un recurso natural que consiste en materiales inorgánicos, orgánicos, aire y agua. Al ser el medio en el que las plantas se establecen y crecen, su función universalmente reconocida, es apoyar la producción de alimentos. Los suelos son de enorme importancia para la producción mundial de alimentos, pero no prestamos la suficiente atención a este "aliado silencioso", como lo advierte el Director General de la FAO, José Graziano, ya que estos son la base para la vegetación que se cultiva o gestiona para producir alimentos, fibras, combustibles o productos medicinales, sostienen la biodiversidad del planeta y albergan una cuarta parte de la misma, ayudan a combatir y adaptarse al cambio climático por su papel clave en el ciclo del carbono, almacenan y filtran agua mejorando nuestra resiliencia ante inundaciones y sequías y es un recurso no renovable, por lo que su conservación es esencial para la seguridad alimentaria y un futuro sostenible. (FAO, 2015).

Las funciones del suelo en las cadenas tróficas y en los ciclos de los elementos esenciales para la vida, son las que determinan la función, sostenimiento y reproducción de esta, además de posibilitar la obtención de materiales para la alimentación, salud, vivienda y vestido a los humanos, forma parte del espacio físico (terreno) en donde desarrolla sus actividades sociales y familiares, tanto de tipo productivo como recreativo (CEDRSSA, 2015).

Si bien la FAO (2017) define en general la degradación del suelo como un cambio en su salud, resultando en una disminución de la capacidad del ecosistema para producir bienes o prestar servicios para sus beneficiarios, la erosión de este se refiere a la pérdida absoluta del suelo, de la capa superficial y de sus nutrientes. La pérdida del potencial productivo del suelo puede ser resultado de procesos naturales, antrópicos o una combinación de ambos, sin embargo, el deterioro de la tierra conlleva a efectos relacionados con la sustentabilidad de los ecosistemas y la sobrevivencia misma de la humanidad. Como soporte los ecosistemas terrestres, se considera al suelo y su calidad como uno de los mejores indicadores de la degradación de la tierra. El suelo tiene una variedad de procesos como la de soporte de la vegetación, el flujo de agua superficial e infiltración, reservorio de nutrientes, de carbono y de biodiversidad, entre otros. Por ello, la degradación del suelo ha llegado a ser un indicador de la degradación de la tierra. Los indicadores para analizar el estado de los suelos son los más robustos y sistematizados actualmente (Pieri *et al*, 1995).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2015) estima que una tercera parte del suelo mundial está moderada o altamente degradada por la erosión, salinización, compactación, acidificación, contaminación química y agotamiento de los nutrientes, además de la pérdida de materia orgánica o sellado del suelo. Lo que indica que los suelos del mundo se enfrentan a una degradación de moderada a grave. A este ritmo de degradación de los suelos, las necesidades de las generaciones futuras están seriamente amenazadas, a menos que se revierta esta tendencia a través de un esfuerzo concertado hacia la gestión sostenible de los suelos.

2.2.1.- Tipos de degradación del suelo

2.2.1.1. Erosión del suelo

Se define como un proceso de desprendimiento, transporte y acumulación de suelo causado por el agua y el viento, lo que provoca el humedecimiento y desagregación de los agregados primarios del suelo, que conduce a la disminución de su capacidad de infiltración y retención de humedad. Aunque la erosión es un fenómeno natural en todos los suelos, el hombre puede acelerar esta por medio de la deforestación, las prácticas agropecuarias inadecuadas, la explotación minera y los asentamientos humanos. (FAO, 2019)

2.2.1.2 Salinización del suelo

La salinidad de los suelos en forma natural se caracteriza por drenajes deficientes y un manto mineralizado muy cercano a la superficie. Esto limita la utilización del riego y la aplicación de técnicas de lavado (Szaboles, 1990), o antrópica, por el mal uso de las prácticas de manejo del suelo y del agua de riego (Dregne *et al.*, 1995), lo que transforma los ecosistemas.

2.2.1.3 Acidificación del suelo

La acidificación de los suelos es un proceso de sustitución de las bases calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y sodio (Na) del complejo de intercambio catiónico del suelo y su sustitución por hidrogeno y/o aluminio en forma natural, y en su forma artificial, la utilización de fertilizantes nitrogenados que contengan o generen amonio (urea, fosfato de amonio), y la utilización de leguminosas que adquieran su nitrógeno (N) vía fijación biológica. Sin embargo, los suelos tienen mecanismos capaces de oponerse a los cambios de acidez (poder buffer). Los suelos arenosos y con bajo contenido de materia orgánica son los que presentan la menor capacidad para amortiguar los procesos de acidificación.

2.2.1.4 Compactación del suelo

La Compactación del suelo corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él, como la maquinaria agrícola, los implementos de labranza o el pisoteo del ganado.

2.2.1.5 Contaminación química del suelo

Este término se refiere a la presencia en la tierra de sustancias químicas que están fuera de lugar o en concentraciones superiores a las normales producidas por la minería y la actividad industrial, como los fertilizantes, los herbicidas, los pesticidas, e incluso los antibióticos de los estiércoles animales, que son importantes contaminantes potenciales y plantean problemas especiales debido a las fórmulas químicas, que se modifican constantemente, impactando además en áreas naturales protegidas rodeadas de parcelas agrícolas (FAO, 2017). Estos contaminantes se extienden en amplias superficies debido al viento y la lluvia. También se puede tener esta contaminación por la mala gestión de las aguas servidas. La FAO (2017) advierte que “El exceso de nitrógeno y de metales traza, como arsénico, cadmio, plomo y mercurio, pueden afectar el metabolismo de las plantas y reducir la productividad de los cultivos”, y agrega, “Cuando entran en la cadena alimentaria, estos contaminantes también representan riesgos para la seguridad alimentaria, los recursos hídricos, los medios de subsistencia rurales y la salud humana”.

2.2.1.7 Lixiviación

Es el fenómeno de desplazamiento de sustancias solubles o dispersables (arcilla, sales, hierro, humus, etc) causado por el movimiento del agua en el suelo, característico de climas húmedos. Lo que provoca que las capas del suelo pierdan sus compuestos nutritivos, se vuelvan más ácidas y a veces origine toxicidad. Por lixiviación pueden perderse grandes cantidades de fertilizantes al descender a los horizontes inferiores del suelo, donde no llegan las raíces de los cultivos. En climas muy húmedos la

vegetación natural, sobre todo la forestal, sirve de protección contra la lixiviación, pero sin esta, el proceso se acelera y la retención de nutrientes en la zona radical se interrumpe. Otras formas de contribuir a la lixiviación, es mediante el empleo de fertilizantes muy ácidos, los riegos excesivos y los cultivos que retienen muchos nutrientes del suelo (Barreira, 1978).

2.2.1.8 Desertificación

Es la degradación de las tierras de las zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas resultante de diversos factores, como las variaciones climáticas y las actividades humanas (Cnuld, 1994).

2.2.1.9 Procesos biológicos

Incluyen la reducción de la biomasa, del contenido de carbono y la pérdida de biodiversidad de la fauna edáfica, donde “*Se considera biomasa a un grupo de productos energéticos y materia primas de tipo renovable que se originan a partir de materia orgánica formada por vía biológica*”, quedando fuera los combustibles fósiles y las materias orgánicas derivadas de éstos (plásticos y productos sintéticos) ya que, aunque los primeros tuvieron un origen biológico, su formación tuvo lugar en tiempos remotos. La biomasa es una energía renovable de origen solar a través de la fotosíntesis de los vegetales. (Renovetec, 2013).

2.2.1.10 Agotamiento de los nutrientes del suelo

Es el fenómeno causado por la degradación del suelo, inducida por las consecuencias de su erosión, las malas prácticas del manejo de tierras, como la tumba y quema y las prácticas agrícolas de subsistencia que no reponen los nutrientes removidos por los cultivos. Este agotamiento de nutrientes sólo se da en

zonas agrícolas y no en sistemas forestales o pastoriles. Los estudios específicos que consideran los balances de nutrientes son utilizados en particular a escala local y regional. (FAO, 2019).

2.2.1.11 Disminución o pérdida de fertilidad

Ocasionado por diferentes factores, como el uso intensivo de la tierra, al promover la extracción de nutrientes sin una restitución adecuada, que conlleva a la pérdida de materia orgánica, deterioro de estructura y agotamiento de los nutrientes del suelo (Cnuld, 1994). Así como la contaminación por sustancias tóxicas de los recursos hídricos, el suelo y del aire, erosión del suelo (hídrica o eólica), que promueve la remoción y pérdida de sustrato acompañado de pérdida de nutrientes, materia orgánica, cambios texturales y estructurales. (Cnuld, 1994). Aunado a la deforestación, fragmentación y degradación o reducción de vegetación forestal, con la respectiva pérdida y disminución de la biodiversidad faunística asociada. (Cnuld, 1994).

Existen varias formas de evaluar la erosión. Para superficies pequeñas es mediante simuladores de lluvia y recolectores de sedimentos en tiempo real. Para el territorio nacional es por exploración de campo sistematizada con el apoyo de imágenes de satélite. De acuerdo con el Conjunto de Datos de Erosión Hídrica generado por el INEGI (2015), este tipo de erosión ocupa el 66% de la superficie nacional, del cual, el 6% es fuerte o extrema. (INEGI, 2015)

2.3 pH

El pH (potencial de hidrógeno) determina el grado de adsorción de iones (H^+) por las partículas del suelo e indica si un suelo está ácido o alcalino. Es el indicador principal en la disponibilidad de nutrientes para las plantas, influyendo en la solubilidad, movilidad, disponibilidad y de otros constituyentes y

contaminantes inorgánicos presentes en el suelo. El valor del pH en el suelo oscila entre 3,5 (muy ácido) a 9,5 (muy alcalino). Los suelos muy ácidos (<5,5) tienden presentar cantidades elevadas y tóxicas de aluminio y manganeso. Los suelos muy alcalinos (>8,5) tienden a dispersarse. La actividad de los organismos del suelo es inhibida en suelos muy ácidos -y para los cultivos agrícolas el valor del pH ideal se encuentra en 6,5. (FAO, 2019).

III. LOS SUELOS DEL MUNDO

En el informe de la FAO (2015), El estado de los recursos de suelos en el mundo, elaborado el por Grupo técnico intergubernamental sobre los suelos de la FAO, reúne el trabajo de unos 200 científicos del suelo de 60 países, con una conclusión arrolladora: la mayor parte de los recursos mundiales de suelos se encuentran en condición mala o muy mala y que las condiciones están empeorando en muchos más casos de los que están mejorando. En particular, el 33 por ciento de la tierra se encuentra de moderada a altamente degradada debido a la erosión, salinización, compactación, acidificación o por la contaminación química de los suelos. De esta superficie, más del 35 por ciento libre de hielo del planeta se ha destinado a la agricultura. Específicamente, alrededor de 68 000 000 has de suelo han sido degradadas por la compactación, principalmente como resultado del tráfico vehicular (Flowers y Lal, 1998), y según plantea Martiren et al. (2016), solo en Europa 33 000 000 ha de suelo arable se encuentra altamente degradado por el reiterado paso del sistema de rodaje de los tractores agrícolas. Por otro lado, Cerisola et al. (2014), el gran desafío es el diagnóstico de la calidad de vida de los suelos para desarrollar un sistema productivo, basado en una agricultura sostenible y plantea que las mejores condiciones para el tráfico son innegables, siempre que sean controlados, pues el tráfico trae como consecuencia modificaciones físicas que conducen a la compactación. Draghi et al. (2015) plantea que es notorio que

el tráfico sobre suelo labrado provoca el 83 % del hundimiento final en la primera pasada. El tráfico posterior y hasta las diez pasadas provoca sólo el 17 % del hundimiento restante. En definitiva, la no labranza evidencia un suelo con mayor capacidad portante, pero sensible a la intensidad del tráfico, aún más que el suelo labrado.

El resultado de los suelos que han sido despejados de la vegetación natural para cultivar o llevar a pastar el ganado, sufren fuertes aumentos de la erosión y grandes pérdidas de carbono del suelo, nutrientes y biodiversidad.

Además, el rápido crecimiento de las ciudades y las industrias ha degradado áreas cada vez más amplias, con la contaminación de suelos con exceso de sal, acidez y metales pesados; compactación con maquinaria pesada; y sellado de forma permanente bajo el asfalto y el cemento. El cambio es un importante motivo adicional de la transformación del suelo, según el informe. Las temperaturas más altas y los fenómenos meteorológicos extremos relacionados, como sequías, inundaciones y tormentas, impactan en la cantidad y fertilidad del suelo en diversas maneras, entre ellas reduciendo la humedad y agotando las capas arables ricas en nutrientes. También contribuyen a un aumento en la tasa de erosión del suelo y el retroceso de las costas.

IV. LOS SUELOS DE MÉXICO

México cuenta con una extensión territorial de 1'964,375 km² (SER, 2014), del cual, el Colegio de Postgraduados (2003), en su *Evaluación de la degradación del suelo causada por el hombre en la*

República Mexicana, establece que de la superficie afectada por los diferentes procesos de degradación, la química ocupa el primer lugar (34.04 millones de hectáreas), seguida por la erosión hídrica (22.72 millones de ha), la eólica (18.12 millones) y la degradación física (10.84 millones). En el caso de la degradación química, el tipo específico dominante fue la disminución de la fertilidad, mientras que en el caso de la física fue la compactación. Tanto en la erosión hídrica como en la eólica, el tipo dominante fue la pérdida de suelo superficial, caracterizada por la remoción uniforme del material superficial por las escorrentías o el viento.

Las causas de la degradación de los suelos en el país involucran actividades de diversa índole: 35% de la superficie degradada se asocia a las actividades agrícolas y pecuarias (17.5% cada una de ellas) y 7.4% a la pérdida de la cubierta vegetal. El resto se divide entre urbanización, sobreexplotación de la vegetación y actividades industriales, (Semarnat y CP, 2003).

Por su parte, Ortiz *et al.*, (1995) hacen una estimación de la degradación del suelo en cuatro categorías, (ligera, moderada, severa y muy severa), y refleja que todos los estados de la República sufren deterioro en su territorio, destacando Tabasco, Jalisco, Colima, Michoacán y Campeche, Aguascalientes y Veracruz y Quintana Roo con un grado muy severo.

Para el 2015, el Colegio de Postgraduados (CEDRSSA, 2015) estima que, en el país, más de 142 millones de hectáreas se encuentran en procesos de degradación física, química o biológica de sus suelos, y que anualmente se degradan 1.4 millones de hectáreas, cifra que implica que en el 72.28% de nuestra superficie, los suelos tienen algún nivel de degradación.

Debido a la magnitud de la superficie con suelos degradados, se demanda una mayor atención tanto de la sociedad como de los tomadores de decisiones en materia de políticas públicas, para que se realicen acciones para la conservación y restauración de los suelos del país (CEDRSSA, 2015).

4.1 USO DEL SUELO EN MÉXICO

Es la utilidad que los seres humanos le dan o pueden dar a la superficie terrestre y a la vegetación que la cubre, la cual se clasifica considerando las áreas con asentamientos urbanos y con infraestructura, con 3.3 millones de hectáreas (1.68%); la acuicultura con 106 mil hectáreas, (0.05%) de la superficie, y se estima que la agricultura abarca 32.6 millones de hectáreas (16.59%) (INEGI, 2015).

En cuanto a vegetación, el matorral xerófito ocupa el 29% de la superficie del país, compuesto de cactáceas, arbustos bajos y pastos. El bosque, con el 18% de superficie, con coníferas, árboles de tipo caducifolio y bosques mesófilos de montaña. La selva, tanto húmeda como seca, con el 16% de la superficie, con especies caducifolias y perennifolias. Los pastos representan el 13% de la superficie, tanto naturales como inducidos. La vegetación hidrófila representa solo el 1.3% con los manglares y los tules. Las áreas sin vegetación aparente y los cuerpos de agua representan el 0.6 y 0.5 por ciento, respectivamente (INEGI, 2015).

V.- MARCO JURÍDICO Y NORMATIVO DE LA DEGRADACIÓN DE TIERRAS.

La degradación de tierras, en un sentido amplio, es un problema que se enfrenta en el mundo, lo que llevó a uno de los acuerdos de la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Desarrollo (CNUMAD) en 1992, referido a la necesidad de establecer una Convención Internacional que potenciara los esfuerzos nacionales de la lucha contra la degradación de las tierras, especialmente, la desertificación. La Convención de las Naciones Unidas contra la Desertificación (Cnuld) es la pieza central en los esfuerzos internacionales para luchar contra la desertificación, la degradación de la tierra y la mitigación

de los efectos de la sequía. Aprobada el 17 de junio de 1994, ratificada por 50 países, entra en vigor en 1996. Actualmente 193 países la integran, incluido México, al ratificar su adhesión el 3 de abril de 1995, con lo que este instrumento jurídicamente vinculante pasó al marco legislativo nacional.

La Convención, en su artículo 5º, requiere que los países firmantes establezcan estrategias y prioridades, en el marco de sus planes y políticas nacionales de desarrollo sostenible, para luchar contra la desertificación y mitigar los efectos de la sequía.

El instrumento básico de aplicación de la Cnuld, es el desarrollo de Programas Nacionales, Regionales y Subregionales de Acción, estando obligados los países y regiones a presentar y mantener actualizados dichos programas, considerando las estrategias preventivas, correctivas y de fomento al manejo sostenible de las tierras.

En este contexto, la atención a los procesos de degradación de tierras ha incluido evaluación del Estado de los recursos nacionales, la integración, aún insuficiente del tema en los marcos políticos y jurídicos, el desarrollo de investigaciones y la puesta en marcha de programas dirigidos a prevenir, controlar y revertir la degradación de las tierras, a través de Semarnat y Sagarpa, principalmente. Sin embargo, la Autoevaluación de las Capacidades Nacionales para la Instrumentación de las Convenciones sobre Diversidad Biológica, Cambio Climático y Combate a la Desertificación en México (AECN) de 2006, donde participaron expertos, funcionarios, organizaciones sociales, el sector empresarial y organismos internacionales, reflejó fortalezas, debilidades y disparidades de la atención de dichas convenciones.

5.1.- ORDENAMIENTO JURÍDICO MEXICANO

A) Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM)

En la base del sistema jurídico, la definición constitucional de derechos de propiedad en función del interés público da pie a la posibilidad de una legislación fuerte en la materia:

A.1) Artículo 27, p.2: *La nación tendrá en todo tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales (...) Con objeto de (...), cuidar de su conservación. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para (...) a efecto de (...) preservar y restaurar el equilibrio ecológico (...); para el fomento de la agricultura, de la ganadería, de la silvicultura (...) y para evitar la destrucción de los elementos naturales (...) en perjuicio de la sociedad.*

A.2) Artículo 4, p.5: *Toda persona tiene derecho a un medioambiente adecuado para su desarrollo y bienestar.*

B) Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación (Cnuld)

La Cnuld tiene carácter vinculante a partir de la ratificación de dicho tratado internacional por el Senado de la República, en 1995. El marco que establece la Convención se basa principalmente en cuatro aspectos: la coordinación de esfuerzos; actuar principalmente de manera preventiva, antes que correctiva; incluir la participación de la sociedad y actualizar la legislación.

C) Ley Orgánica de la Administración Pública Federal (LOAPF)

Establece las bases de organización de la Administración Pública Federal, centralizada y paraestatal, y define las facultades que corresponden a las diversas carteras del Ejecutivo Federal. Encomienda a la Semarnat la conducción de la política nacional en materia de conservación de recursos naturales y a la Sagarpa a participar en la conservación de los suelos agrícolas, pastizales y bosques.

D) Ley Agraria (LA)

Es la base regulatoria de la propiedad social de la tierra, que abarca más de la mitad del territorio y es prevaleciente en las principales áreas vulnerables y degradadas.

E) Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA)

Encuentra las referencias sobre el tema de la degradación de las tierras en el capítulo segundo del título tercero, sobre el aprovechamiento sustentable del suelo y sus recursos, así como de los recursos forestales, donde se observa un enunciado general y la figura de decreto de zonas de restauración.

F) Ley de Desarrollo Rural Sustentable (LDRS)

Publicada en 2001, se desprende considerar como objeto de la lucha contra la desertificación y la degradación de las tierras en todas las condiciones climáticas del país. La Ldrs contiene diversas disposiciones favorables a la conservación de tierras, entre las cuales, se cuenta la inclusión del mejoramiento de tierras como uno de los objetos de la inversión pública en infraestructura y el esquema de Contratos de Aprovechamiento Sustentable de Tierras.

Otra disposición relativa a la lucha contra la degradación de tierras y desertificación es la formación del Sistema Nacional de Lucha contra la Desertificación y la Degradación de los Recursos Naturales (Sinades), parte integrante de los dispositivos para la participación, concertación y concurrencia considerados en la Ldrs.

G) Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable (LGDFS)

La versión vigente de la ley de esta materia es la última de una larga serie de leyes que han variado sustancialmente su contenido, lo que refleja variaciones en la política forestal mexicana y, con ello, problemas para su aplicación.

La Lgdfs incluye varios componentes importantes relacionados con el manejo sustentable y la conservación de las tierras: prohibición del cambio de uso de las tierras forestales, a excepción de casos justificados por la utilidad pública, establece un instrumento financiero para un manejo ágil de recursos y la posibilidad de hacer concurrir la gestión forestal con la de desarrollo rural.

H) Ley de Aguas Nacionales (LAN)

Esta ley se relaciona con el manejo sustentable de tierras, en la medida que la cuenca hidrológica tiene un comportamiento dependiente del estado de los recursos, con consecuencias en la recarga de los acuíferos, reducción de azolves en infraestructura y, en la medida que los fenómenos meteorológicos extremos se han agudizado y hecho más frecuentes, se ha destacado la importancia de mejorar la calidad de las tierras en función de reducir los riesgos de inundaciones y avalanchas.

I) Ley General de Vida Silvestre (LGVS)

Esta ley ha mostrado un impacto significativo, particularmente por la constitución de las unidades de manejo de flora y fauna (Uma), que proporcionan esquemas de aprovechamiento extractivo y no extractivo con potencial para aportar beneficios a los dueños de los recursos y auspiciar así el hábitat de fauna y flora con interés de biodiversidad. Aborda el tema de la Desertificación acotándolo a una problemática casi exclusiva de las regiones áridas, semiáridas y subhúmedas.

Ley de conservación de suelos y aguas

VI.- COMPACTACION DE LOS SUELOS

6.1.- Factores de la compactación del suelo

Los factores que afectan la compactación de un suelo determinado pueden ser divididos en externos e internos. El factor externo primario es el esfuerzo de compactación aplicado al suelo, y los factores internos incluyen la distribución del tamaño de las partículas, la materia orgánica, la mineralogía y contenido de agua del suelo (Harris, 1971; Howard, Singer & Frantz, 1981).

Entre los factores externos, las fuerzas aplicadas generalmente son mecánicas, siendo la principal fuente de estos, el tráfico vehicular, debido principalmente al aumento del tamaño de la maquinaria agrícola, el incremento de las masas y el incremento en el tráfico, que asisten a la mecanización de la producción agrícola han llevado a un aumento en la aplicación de estas fuerzas a los suelos (Cohron, 1971; Soane et al., 1981). El tractor con su gran masa y presión concentrada bajo las ruedas es tal vez el mayor factor que contribuye hacia la compactación del suelo (Koch & Badenhorst, 1977; Trowse & Cooper, 1969).

No solo las operaciones de riego bajo operaciones de labranza, sino también los diferentes métodos y tasas de aplicación del agua influyen en la compactación del suelo. Según Goryunov (1966) los aspersores tienen menos efectos nocivos en los micro agregados que los riegos por inundación. Finkie y Nir (1959) encontraron que la inflación del agua en el suelo bajo riego de aspersion fue hasta seis veces mayor que en el caso del riego por inundación.

En los factores internos, la compactación puede ocurrir en suelos de diferente textura, pero ciertos tipos son más susceptibles a la compactación que otros, con variables como la resistencia a la penetración, grado de compactación y contenido de humedad, donde la distribución del tamaño de la partícula es una propiedad que determina la compactibilidad.

4.1.1.- Maquinaria agrícola

La compactación del suelo por el tráfico de la maquinaria en la agricultura es un problema bien conocido en muchas partes del mundo (Chan *et al.*, 2006; Gysi, 2001), como lo reportado en casi todos los continentes, como Australia, Japón, Rusia, China o Nueva Zelanda (Hamza y Anderson, 2005).

En la mayoría de las operaciones agrícolas comunes, si no todas, incluidas las del sistema de labranza cero, son realizadas por máquinas de ruedas pesadas (Tullberg *et al.*, 1990), a lo que contribuyen Hamza y Anderson (2005), que informan que más del 30% de la superficie terrestre es objeto de tráfico por los neumáticos de maquinaria pesada.

Por su parte, Glinski y Lipiec (1990) definen la compactación del suelo como un incremento de la densidad aparente del suelo (DA), un empaquetamiento de partículas más denso y una disminución de la porosidad (PO), especialmente en lo referente a macroporos.

En un sentido agronómico, la compactación es el resultado de la aplicación al suelo de cualquier fuerza, como la ejercida por la labranza y el tránsito rodado de maquinaria agrícola, que incrementa la densidad aparente del suelo y, concurrentemente, disminuye la porosidad de este (Soil Science Society of America, 2013). La compactación del suelo también afecta a la mineralización del carbono y nitrógeno de la materia orgánica y del rastrojo (Neve y Hofman, 2000), así como a la concentración del dióxido de carbono (Conlin y Driessche, 2000). La compactación del suelo se asocia frecuentemente con un decremento en el rendimiento del cultivo, al restringir 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 y América del Norte (Eriksson *et al.*, 1974), y entre 40 y 90% en países del oeste de África (Charreau, 1972; Kayombo y Lal, 1994). En Ohio, USA, se reportaron decrementos en el rendimiento de maíz del orden del 25%, 20% en soya y 30% en avena en un estudio de siete años (Lal, 1996).

En la compactación del suelo influyen factores asociados a la maquinaria como: presión sobre el suelo, carga sobre los sistemas de rodaje, número de pases, velocidad de desplazamiento y patinaje (Hamza y Anderson, 2005). Varias han sido las investigaciones que muestran el incremento de la compactación al aumentar la presión media sobre el suelo. Esta depende de la rigidez, presión de inflado y superficie de contacto del neumático con el suelo, así como, de la resistencia de la superficie sobre la que se apoya (González-Cueto et al., 2017). La presión sobre el suelo influye mayormente sobre la compactación en la capa superficial del suelo ($\approx < 0,3$ m) y en profundidad la compactación es ocasionada por la carga sobre los ejes (Botta et al., 2012; González-Cueto et al., 2013). Los sistemas de rodaje por esteras potencialmente compactan menos que los sistemas de rodaje por neumáticos debido a menores esfuerzos sobre el suelo y menor riesgo de compactación del suelo (Keller y Arvidsson, 2016).

El uso excesivo de maquinaria agrícola, el cultivo intensivo, cortas o nulas rotaciones de cultivo, pastoreo intensivo y un manejo inapropiado del suelo traen como resultado la compactación, incrementada por un bajo contenido de materia orgánica y la labranza o pastoreo cuando el suelo tiene un alto contenido de humedad. La compactación incrementa la dureza del suelo y disminuye la fertilidad física de este cuando minimiza el almacenamiento y suministro de agua y nutrientes, esto ocasiona incremento en la aplicación de fertilizantes con el consabido aumento en el costo de producción. Al mismo tiempo, decrece el tamaño de las plantas, origina menores entradas de materia orgánica, se reduce el reciclaje de nutrientes y mineralización, así como un decremento en la actividad de los microorganismos del suelo (Hamza y Anderson, 2005).

Por su parte, la maquinaria agrícola se ha vuelto significativamente más grande y pesada en las últimas décadas, para aumentar la eficiencia en el campo (capacidad efectiva), lo que aumenta considerablemente el riesgo de compactación del suelo, por la severidad y profundidad de la zona compactada, la porosidad se reduce y algunas propiedades químicas y físicas, como el contenido de agua, la infiltrabilidad, la

conductividad eléctrica, la porosidad, la aireación, el aumento de la densidad, la circulación del agua o la dureza de esta, así como un aumento de la impedancia a granel para la exploración de la raíz, son afectadas, de manera que el desarrollo de la raíz y el crecimiento del cultivo se impactan negativamente. Estos atributos físicos y químicos se describen como “propiedades del comportamiento” de la compactación del suelo, y se usan con frecuencia para servir como indicadores de esta (Johnson y Anderson, 2002). Normalmente, el contenido de humedad en el suelo es el factor más importante de influencia en los procesos de compactación (Soane y Van Ouwerkerk, 1994; Hamza y Anderson, 2005). Además, el grado de compactación del suelo originado por la labranza y el tráfico de la maquinaria pesada es también con frecuencia una función de la textura del suelo, de su densidad inicial, estructura, contenido de materia orgánica (MO) y las condiciones climáticas, como la temperatura (Cassel, 1982; Raper *et al.*, 1998; Mosaddeghi *et al.*, 2000). En general, la profundidad de la compactación varía ampliamente de 10 a 60 cm (Flowers y Lal, 1998), pero su efecto en el crecimiento del cultivo es más pronunciado cuando se presenta en la superficie del suelo (15 cm). Los valores superiores a 2 MPa en la resistencia a la penetración, (llamado también Índice de cono: IC), podrían corresponder a las condiciones del suelo y podrían limitar el crecimiento de las raíces y el desarrollo de las plantas (Hamza y Anderson, 2005; Murdock *et al.*, 1995; Taylor y Gardner, 1963)

La investigación sobre la compactación del suelo por el tráfico de la maquinaria agrícola, ha revelado que es probable que bajo labranza mínima el porcentaje supere el 60%, y en labranza convencional excedería el 100% durante un ciclo de cultivo (Hamza y Anderson, 2005) y el 30% bajo labranza cero (Tullberg, 1990), que el primer pase de una rueda causa la mayor compactación (Alakukku, 1996) y el daño de las ruedas bajo altas cargas de los ejes se incrementa en suelos húmedos, porque reduce su dureza (Kirby y Kirchoff, 1990). Esta acción resulta relevante porque la labranza y cosecha comúnmente necesitan hacerse en suelo húmedo (Radford *et al.*, 2007).

Según Hamza y Anderson (2005), casi todos los neumáticos aumentan significativamente la compactación del suelo en la pista de la rueda y la intensidad de la tracción desempeña un papel importante en la compactación del suelo, ya que las deformaciones pueden aumentar con el número de pasadas (también Botta *et al.*, 2004; Zhang *et al.*, 2006).

Håkansson y colaboradores (1988), así como Voorhees (1992), mencionan que la mayor parte del conocimiento disponible de los efectos de la compactación del suelo causada por el tráfico de la maquinaria agrícola ha sido adquirida por experimentos de campo. La cuantificación de la compactación del suelo requiere con frecuencia de un muestreo destructivo, por lo que la medición directa la mayoría de las veces se considera impráctica. Además de la densidad aparente (DA) y la porosidad (PO), la dureza del suelo es una medida alterna comúnmente usada (Canarache, 1991), que emplea un penetrómetro de cono como instrumento estándar (Mulqueen *et al.*, 1977; Bengough y Mullins, 1990). Este penetrómetro de cono determina un índice de la dureza del suelo, o resistencia a la penetración (RP), 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, 2008). Investigadores como Canarache (1991), Lowery y Schuler (1994) y Ngunjiri y Siemens (1995) han documentado los incrementos del IC que ocurren con los incrementos de la compactación y la DA. Otros factores que afectan el IC, aparte de la compactación, incluyen el contenido de agua y las arcillas del suelo (Elbanna y Witney, 1987).

Según Kroulik *et al.*, (2009), de acuerdo con la tecnología de preparación primaria de suelos en la República Checa, con un tractor de ruedas individuales traseros, el área traficada se calculó en un 87,5% y un tractor con ruedas traseras duales se calculó un 95,3%. Así mismo, el autor plantea que cuando se realizan labores complementarias a la preparación primaria de suelos, se llega al 90.9% del área que cubren las ruedas sencillas del tractor y hasta un 145,6% cuando se utilizan ruedas dobles en la

transmisión trasera de la maquinaria agrícola. En labranza mínima los resultados llegaron a 72,8% con ruedas dobles y 44,8% con ruedas sencillas. Los mejores resultados fueron para la labranza cero con 55,7% del área cubierta con tractores de llantas dobles y 18,4% con llantas sencillas.

La principal preocupación de los productores acerca de la compactación de los suelos es el impacto en los rendimientos del cultivo, las pérdidas por esta causa han sido bien documentadas para diferentes cultivos. La compactación del suelo puede reducir significativamente el rendimiento del maíz (Bicki y Siemens, 1991; Lowery y Schuler, 1994; Ngunjiri y Siemens, 1995). Esta reducción en la producción de maíz debida a una compactación severa y moderada fué de aproximadamente 50 y 25% respectivamente (Gaultney *et al.*, 1982). Raghavan *et al.*, (1979) indican que el rendimiento del maíz se redujo hasta en un 50% en un año lluvioso debido al tráfico de vehículos, mientras que, en un año seco típico, las pérdidas ascendieron al 30%.

De la revisión bibliográfica se desprende claramente que la compactación del suelo es un factor importante de degradación, debido al tráfico de máquinas agrícolas, incrementado por el número de pases de la maquinaria y con el tiempo de exposición de la superficie del suelo a la presión de contacto. También se conoce el porcentaje de la superficie de tierra trabajada bajo diferentes tecnologías de labranza del suelo. Por el contrario, sólo se dispone de poca o ninguna información sobre la distribución real del tráfico de campo durante un ciclo de cultivo.

Es necesario destacar la naturaleza oculta de la degradación estructural del suelo (*DES*), la cual 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 empeoran la *DES* (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 aflojamiento han resultado decepcionantes, la Unión Europea la ha reconocido como una forma severa de degradación del suelo (Akker y Canarache, 2001). En su obra Wild (1992), plantea que la compactación y consolidación del suelo, acompañada por la pérdida de los poros más grandes, es el resultado de la deformación y rotura bajo carga de los agregados del suelo y poros, y conduce a una pérdida de permeabilidad para el agua y las raíces.

Los efectos de la compactación sobre los cultivos y propiedades del suelo son complejos (Batey, 1990), y, ya que el estado de la compactación es un importante atributo estructural del suelo, se tiene la necesidad de encontrar un parámetro para su caracterización, 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 (DA) 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. Estos, 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).

4.1.2.- Contenido de agua en el 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 and 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 cm 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)

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 (Atwell, 1990; Venanzi *et al.*, 2002), mientras que Venanzi y Kruger (2004)

comprobaron que incrementos en la densidad aparente condicionaron el crecimiento temprano de cereales de invierno, siendo menos evidente en trigo que en avena. 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 del suelo, 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.

Cuando la frecuencia del tránsito mecanizado disminuye, el factor de compactación se minimiza y este decremento se aprecia más 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).

Con altos contenidos de agua, cuando el suelo usualmente se deforma fácilmente, puede darse poca compactación a menos que haya tiempo y oportunidad para que el agua escape. Así, con suelos mojados bajo las cargas transitorias producidas por el tráfico y algunos aperos, puede haber encharcamiento, deformación, pérdidas de agregados y quizás algo de dispersión, con poca pérdida de volumen de suelo, pero al secarse se vuelve intrínsecamente más fuerte, la susceptibilidad a la compactación puede

aumentar pues los poros más amplios, que se vacían primero, son relativamente débiles y con el aumento del secamiento adicional el aumento de la resistencia del suelo se hace predominante.

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 de manera interesante que existe un nivel óptimo de compactación para el crecimiento del cultivo. El concepto de nivel óptimo de compactación es importante, especialmente en sistemas de tránsito controlado, donde se evita cualquier fuente externa de compactación porque ésta podría causar un nivel de compactación menor al óptimo y decrementos en el rendimiento. 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).

4.1.3.- Raíces de las 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). La resistencia del suelo está implicada en su oposición (Wild, 1992) al crecimiento de las raíces. Para que estas se extiendan libremente debe haber suficientes poros de un diámetro igual o mayor que el del ápice radicular (alrededor de 200 μm) o bien el suelo debe deformarse fácilmente y la aireación no debe ser limitante.

Es importante plantear que la mecánica de la penetración radicular se ha estudiado durante muchos años, pero el mecanismo exacto permanece oscuro y difiere de acuerdo con las condiciones particulares de la planta-suelo. Según Pfeffer, citado por Wild, (1992), midió las presiones axiales radiculares de aproximadamente un Mega Pascal (10 bar), menos que la resistencia que ofrecen a la penetración muchos suelos compactados. Desde entonces se han realizado muchas mediciones similares, aunque la mayor atención parece haberse prestado al suelo, más que a raíz y a su resistencia a diferentes penetrómetros. 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 Kladvko, 1987). Este efecto también se ve influenciado por la microflora 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).

5.- PARÁMETROS

5.1.- Mapeo por GPS

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), por las prácticas tecnológicas en la agricultura convencional, es muy difícil localizar y racionalizar la compactación, porque las marcas del sistema de rodaje de los tractores y las máquinas agrícolas en la superficie del suelo no son evidentes (McGarry, 2001)

Un sistema de posicionamiento global (GPS) como receptor de un equipo en un tractor, se puede utilizar para detectar áreas en el campo donde aparecen las huellas del paso del sistema de rodaje de las máquinas agrícolas durante el trabajo de esta, es decir, se tiene un tráfico múltiple. Yule, *et al.*, (1999) utilizó un tractor completamente equipado con un sistema de posicionamiento global para trazar mapas del comportamiento del conjunto máquina tractor en el campo y con ello demostró que el efecto de la compactación casi duplicó los costos de labranza en los extremos de los campos. Richards (2000) también utilizó un GPS en un tractor para mapear todos los movimientos del tractor con la maquinaria agrícola dentro del campo de cultivo a lo largo del ciclo agrícola completo.

Milan Kroulik, *et al.*, (2009), con la tecnología de preparación primaria de suelos, los tractores fueron dotados con GPS a bordo de estos, a lo largo de todo el ciclo del cultivo, con un sistema controlado del tráfico (CTF), el cual, trata de manejar la compactación del suelo, confinándola a tiras estrechas a través de la tierra y maximizando el área restante del suelo sin daños para el cultivo. En la práctica significa emparejar las pistas de la maquinaria de modo que tomen la menor área posible, con resultados que coinciden en gran medida con lo hallado por Hamza y Anderson, 2005; Tullberg *et al.*, 2007.

5.2.- Resistencia a la penetración

La resistencia a la penetración (RP) es un indicador bien conocido y se ha utilizado para evaluar la impedancia del suelo para el desarrollo de la raíz (Keller *et al.*, 2015; Lima, Silva, Silva, le ~ AO, & Mosaddeghi, 2016; Silva *et al.*, 1994) e identificar la compactación del suelo por el tráfico de campo (Keller *et al.*, 2013; O'Sullivan *et al.*, 1987). Sin embargo, la RP varía dependiendo de la densidad y el contenido de humedad (Vaz, Manieri, Maria, y Tuller, 2011; Vaz, Maria, & Genuchen, 2013), los cambios en la distribución del tamaño del poro, además de los efectos de la fricción y la textura del suelo (Ekwue & Stones, 1995; Vaz *et al.*, 2011).

La 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, 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 (se 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).

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).

La resistencia a la penetración (RMP) es muy utilizada porque refleja fielmente la resistencia del suelo a la penetración radicular (Hamza and Anderson, 2001). Los penetrómetros de cono, dispositivos usados para medir la resistencia mecánica a la penetración de los suelos han sido ampliamente utilizados a lo largo de los años y con diversas aplicaciones dada la facilidad de operación que presentan.

Las principales ventajas de utilizar este método son: rapidez y fácil manejo (Hakansson y Vooehes, 1988), potenciales relaciones con la condición física del suelo para la elongación radicular (Taylor y Gardner, 1963), y la capacidad para medir variaciones espaciales en la compactación superficial y subsuperficial (Hakansson y Voorhees, 1988).

La resistencia a la penetración del suelo medida como índice de cono varía con otras propiedades, además del contenido de humedad y la densidad aparente, con la textura del suelo y el contenido de materia orgánica (Taylos y Gardner, 1963; Perumpral, 1987; Ley *et al.* 1994; Chesness *et al.* 1972; Mulqueen *et al.* 1977; Knight, 1948; Patrizzi *et al.* 2003). Por este motivo, las mediciones de RMP que no contemplen la correspondencia con los estados de humedad pueden resultar inútiles (Cerana *et al.* 2005)

OBJETIVOS

General

Mapear las pasadas del sistema de rodaje de los tractores registradas por medio del receptor de señal de GPS, calcular la superficie por donde se desplaza el conjunto máquina tractor en el campo de cultivo y puntos de mayor compactación del suelo.

Particulares

- Determinar el recorrido que hace el tractor en cada labor agrícola
- Optimizar en el área de estudio la cinemática de tránsito del conjunto máquina tractor y el ancho de cabecera del campo para sus virajes.
- Determinar los puntos con mayor efecto de la compactación por el desplazamiento del conjunto máquina tractor

HIPÓTESIS

Las pasadas del sistema de rodaje de los tractores y máquinas agrícolas en el ciclo del cultivo del maíz cubren aproximadamente el 100% de la superficie y aumenta la compactación del suelo.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

**APLICACIÓN DE LA ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA EN LA INTERPRETACIÓN DE LA
COMPACTACIÓN GENERADA POR MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

**APPLICATION OF THE DESCRIPTIVE STATISTICS IN THE INTERPRETATION OF THE
COMPACTION GENERATED BY AGRICULTURAL MACHINES**

Enrique García-Rodríguez², José Francisco Ramírez-Dávila, Andrés González-Huerta, Rodolfo Serrato-Cuevas, Delfina de Jesús Pérez-López, Francisco Gutiérrez-Rodríguez^{1*}.

²Estudiante del Programa de Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales; Facultad de Ciencias Agrícolas, UAEM. ¹Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario “El Cerrillo”, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca Estado de México. Tel: 017228517314; Universidad Autónoma del Estado de México, Centro Universitario “El Cerrillo”, El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca Estado de México. C. P. 50090. Telf: (722) [2965529](tel:2965529). egarcia0105@hotmail.com, framirezd@uaemex.mx; agonzalezh@uaemex.mx; seccum@hotmail.com, djperezl@uaemex.mx.

* Autor para correspondencia, Author for correspondence: fgrfca@hotmail.com

Titulo corto: **COMPACTACIÓN GENERADA POR MÁQUINAS AGRÍCOLAS**

RESUMEN

Existen en la actualidad una gran cantidad de dificultades en la agricultura asociados a la compactación donde se utilizan a veces de forma desmedida tractores y máquinas agrícolas pesadas y los cuales producen daños en la estructura física de los suelos que pueden perdurar años. En el actual ensayo se ha deseado conocer la diferencia de la compactación en un suelo vertisol, utilizando dos métodos de labranzas (tradicional con arado de discos y reducida con multiarado). Se ha utilizado la estadística descriptiva en la interpretación de los datos como una forma de hacer más accesible la comprensión de los mismos por los agricultores. En las mediciones del índice de cono máximo ($I_c(\text{máx})$) después de realizada la siembra con sembradora de alta precisión John Deere modelo 1035 y tractor de la misma marca modelo 6603, con preparación del suelo con arado de discos, en las profundidades de 0.0 a 7.5 cm el $I_c(\text{med})$ siempre fue mayor de 3.0 MPa y a partir de esta última profundidad fue igual o mayor de 6.0 MPa, sin embargo en la preparación de suelos con multiarado los valores fueron numéricamente menores y solo se alcanzó los 6.0 MPa en el perfil de 12.5 a 15.0 cm. Los valores del índice de cono medio ($I_c(\text{med})$) y la mediana ($I_c(\text{Me})$) se comportaron distantes entre sí en la preparación de suelos con arado de discos y el 58 % de ($I_c(\text{med})$) está por encima de 2.0 MPa, contrariamente a lo mostrado con la preparación de suelos con multiarado después de la siembra.

Palabras claves: Multiarado; Arado de discos; Índice de cono; Suelo Vertisol.

ABSTRACT

There are currently a lot of difficulties in agriculture associated with compaction where tractors and heavy agricultural machines are sometimes used excessively and which

cause damage to the physical structure of soils that can last for years. In the current trial it has been desired to know the difference of compaction in a vertisol soil, using two methods of tillage (traditional with disc plow and reduced with multi-plow). Descriptive statistics have been used in the interpretation of the data as a way to make their understanding more accessible by farmers. In the measurements of the maximum cone index ($I_c(\max)$) after sowing with John Deere high-precision seeder model 1035 and tractor of the same model model 6603, with soil preparation with disc plow, at the depths of 0.0 to 7.5 cm the $I_c(\text{med})$ was always greater than 3.0 MPa and from this last depth it was equal to or greater than 6.0 MPa, however in the preparation of soils with multiarado the values were numerically lower and only 6.0 MPa was reached in the profile from 12.5 to 15.0 cm. The values of the average cone index ($I_c(\text{med})$) and the median ($I_c(\text{Me})$) behaved distant from each other in the preparation of soils with disk plow and 58% of ($I_c(\text{med})$) is above 2.0 MPa, contrary to what was shown with the preparation of soils with multi-plow after sowing.

Keywords: Multiarado; Plowing discs; Cone Index; Vertisol soil

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). La extensión de suelo compactado mundialmente se estima, tan sólo por tránsito de maquinaria agrícola, en 68 000 000 ha (Flowers y Lal, 1998). La compactación se ha considerado como responsable de la degradación de 33 000 000 ha de suelo en Europa (Akker y Canarache, 2001) y cerca de cuatro millones de hectáreas en Australia Occidental (Carder y Grasby, 1986).

La ingeniería de suelos define a la compactación como, el proceso mediante el cual 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. El cultivo del maíz es el más importante en la república mexicana y en muchos países. Los suelos vertisol que se están utilizando en lo particular en el Valle de Toluca en este cultivo están compactados por el paso reiterado de los tractores y máquinas agrícolas en el proceso de preparación primaria del suelo hasta la cosecha. Diversos estudios han revelado que la mayor parte del conocimiento disponible de los efectos de la compactación del suelo inducida por el tráfico de maquinaria ha sido adquirida por experimentos en campo (Voorhees, 1992). El cuantificar la compactación del suelo requiere con frecuencia de un muestreo destructivo, por lo que la medición directa muchas veces se considera impráctica. Además de la (densidad aparente) DA y la (porosidad) PO, la dureza del suelo es una medición alterna comúnmente usada (Canarache, 1991), que emplea un penetrómetro de cono como instrumento estándar (Bengough y Mullins, 1990). El penetrómetro de cono determina un índice de la dureza del suelo, conocido como índice de cono (I_c), 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, 2008). Diversos investigadores (Canarache, 1991; Lowery y Schuler, 1994; Ngunjiri y Siemens, 1995) han documentado los incrementos del índice de cono (Ic) que ocurren con los incrementos en la compactación y la densidad aparente (DA). Otros factores principales que afectan al índice de cono (IC) aparte de la compactación incluyen al contenido de agua y la arcilla del suelo (Elbanna y Witney, 1987). La compactación ha originado una disminución en el rendimiento entre 25 y 50% en algunas regiones de Europa y América del Norte, y entre 40 y 90% en países del oeste de África (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). En los Estados Unidos, se han estimado pérdidas económicas anuales en la producción agrícola, atribuibles a la compactación del suelo, de \$1 200 000 000 de dólares (Gill, 1971). A pesar del hecho de que la compactación del suelo se considera como el más grave problema ambiental causado por la agricultura convencional es muy difícil localizar y racionalizarlo, porque las huellas que dejan los sistemas de rodajes de los tractores es muy difícil identificarlos en el campo después de varios días (McGarry, 2001). Por otro lado un sistema de posicionamiento global (GPS) como receptor de un simple equipo en un tractor se puede utilizar para la detección de áreas en el campo donde aparece el tráfico múltiple. 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 preparación de la cama de 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 reducirán los costos unitarios de producción (Carter *et al.*, 1991).

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente ensayo fue realizado en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, de abril 2018 a marzo 2019. Esta facultad está ubicada a los 19° 23' 30" de latitud norte y 99° 41' 30" de longitud oeste del meridiano de Greenwich a una altitud de 2 640.5 m.s.n.m. En el Campus Universitario la superficie total disponible es de 110 ha. La clasificación del suelo, de acuerdo al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA), se encuentra en el orden vertisol, y dentro del subgrupo Entic pelluderts, con un contenido de arcilla superior al 30 % hasta los 50 cm de profundidad, provocando la formación de grietas de más de un centímetro de anchura. Esta cantidad de arcilla provoca la formación de las superficies de fricción propias de los suelos que se encuentran dentro de este orden. El terreno utilizado para el ensayo tenía cinco años sin utilización agrícola y el parámetro escogido fue el índice de cono (Ic), en 25 puntos de cada una de las parcelas objetos del estudio. Las tecnologías de preparación del suelo utilizadas fueron, la labranza convencional del suelo basada en el arado y con una superficie de 16 416 m², así como labranza mínima o reducida, utilizando el multiarado (esta tecnología en el Valle de Toluca se utiliza de forma muy reducida por los agricultores) con una superficie de 17 510 m², en un suelo con cinco (5)

años sin cultivar. Las características de los tractores y los implementos utilizados para las labores primarias y complementarias (siembra y cultivo) en ambas tecnologías, se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Características técnicas de las máquinas empleadas en el ensayo.

Modelo del tractor y máquinas agrícolas	Masa de máquinas agrícolas (kg)	Medida de las ruedas traseras (pulg.)	Medida de la rueda delantera (pulg.)	Trocha del tractor (m)
6603 J.D	4163.0	18.4-34	14.9-24	1.60*
5715 J.D.	2790.0	15.5-38	7.50-16	1.60*
4235 J.D.	5021.0	18.4-34	13.6-24	1.90*
5415 J.D.	2690.0	16.9-30	10.0-16	1.60*
Multiarado AS-250	180.0			2.40**
Arado J.D. mod.635	550.0			1,02**
Rastra MX-225	2003.2			3.00**
Cultivadora MX-10	62.0			2.40**
Sembradora modelo 1035	1300.0			2.40**

*ancho de vía del tractor de centro a centro de las ruedas traseras, **ancho de trabajo del implemento agrícola.

El índice de cono (Ic) del suelo fue medida con un compactómetro digital Field Scout modelo SC900 (Soil Compaction Meter Spectrum Technologies, Inc. Illinois), los valores de Ic fueron obtenidos en 25 puntos de cada una de las parcelas y con una profundidad de 30 cm, espaciadas cada 2,5 cm de profundidad y la distancia entre cada punto fue de 35 m. Para el análisis de los datos se ha utilizado la estadística descriptiva por la alta heterogeneidad de los datos que se obtienen de los índices de cono (Ic) en estos ensayos y por esto en cada uno de los niveles de profundidad se han determinado diferentes

estadígrafos, los cuales fueron calculados con Excel, como son: coeficiente de variación por niveles de profundidad (CV), con la finalidad de conocer la dispersión relativa del conjunto de datos observados del índice de cono; coeficiente de asimetría (Ca) para de esta manera conocer el grado de simetría de la distribución alrededor de la media aritmética, coeficiente de curtosis (Cu) para cada distribución y con ello saber hasta qué grado los datos se acercan a una distribución normal y cuál es su concentración; desviación estándar (σ) en el análisis es importante ya que se desea conocer la desviación de los datos del índice de cono en relación a la media aritmética y con ello poderlos interpretar y describir para la correcta toma de decisiones en las conclusiones, valor medio de los índices de cono por niveles de profundidad (Ic(med)), mediana (Ic(Me)), se utiliza para conocer el acercamiento que la misma tiene con la media aritmética y así eliminar el posible sesgo que se tiene en los datos obtenidos por valores extremos; valores máximos del índice de cono (Ic(máx)) y valores mínimos del índice de cono (Ic(mín)), por niveles de profundidad, para poder calcular la diferencia existente entre cada uno de ellos por niveles.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar estadísticamente las diferentes variables en los distintos métodos de labranzas se encontró que existen diferencias notables en los índices de cono (Ic(med)) por niveles de profundidad y para la interpretación y argumentación de los datos obtenidos se ha utilizado la estadística descriptiva. En el cuadro 2, se pueden observar el comportamiento del índice de cono (Ic(med)) después de la siembra, con una sembradora integral de precisión modelo 1035, uncida a un tractor J.D.6603 y que el conjunto máquina tractor tienen una masa total de 5463 kg, más la masa adicionada de maíz y fertilizante, es

necesario plantear que en las labores de rastra se utilizaron tractores livianos y con masa aproximada a las 2.5 t, o sea que la utilización de los tractores fue de forma combinada.

Cuadro 2. Estadística descriptiva del índice de cono (Ic) después de realizada la siembra de maíz, con preparación de suelo con arado de discos en la preparación primaria del suelo vertisol (2018-2019) en el Valle de Toluca.

Profundidad (cm)	Ic(med) (MPa)	Ic(Me) (MPa)	Ic(mín) (MPa)	Ic(máx) (MPa)	σ	CV (%)	Ca	Cu
0-2.5	0.31	0.60	0.07	3.58	0.74	239.50	8.14	11.69
2.5-5.0	0.60	0.39	0.07	3.58	1.02	169.42	1.81	2.24
5.0-7.5	0.77	0.30	0.07	3.76	1.12	146.23	1.23	1.39
7.5-10.0	1.22	0.53	0.07	6.00	1.44	118.50	0.56	2.51
10.0-12.5	2.16	0.88	0.07	6.00	2.28	106.70	0.07	-
12.5-15.0	3.81	6.00	0.18	6.00	2.51	65.93	-	-
15.0-17.5	4.80	6.00	0.25	6.00	2.16	45.02	0.02	1.77
17.5-20.0	5.43	6.00	0.70	6.00	1.56	28.91	-	-
20.0-22.5	5.86	6.00	2.49	6.00	0.68	11.73	0.13	0.26
22.5-25.0	5.84	6.00	2.04	6.00	0.77	13.30	-	-
25.0-27.5	5.83	6.00	1.86	6.00	0.81	13.90	0.63	4.11
27.5-30.0	5.84	6.00	2.04	6.00	0.77	13.30	-	-
							14.45	20.05
							10.01	20.03
							8.79	20.03
							10.01	3

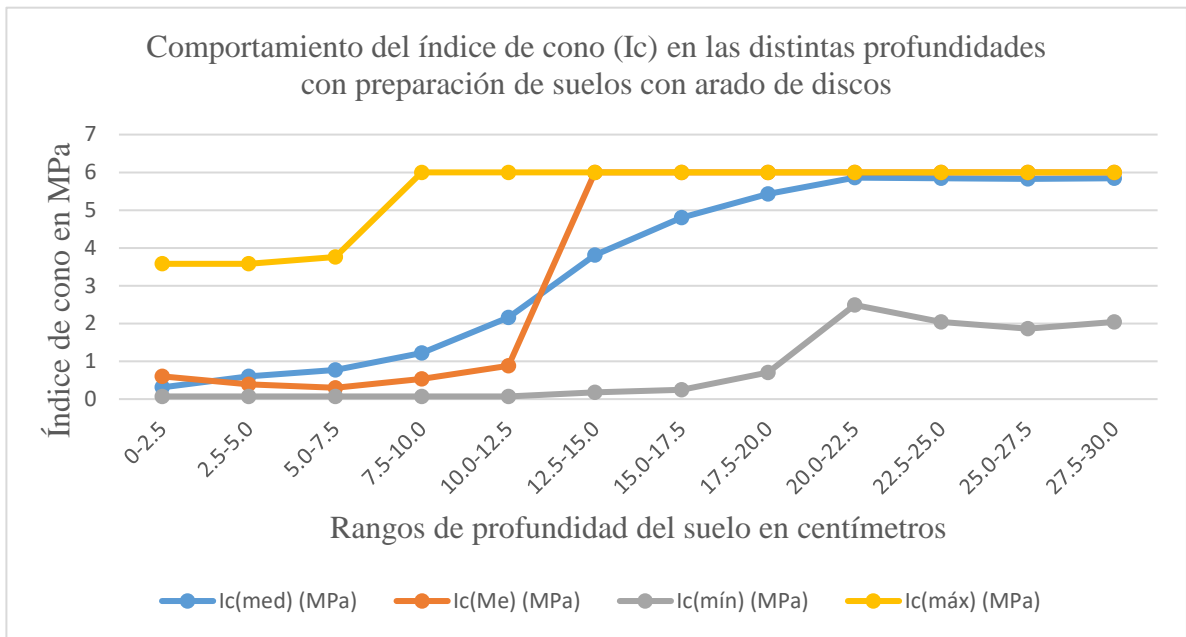
Ic (med)-(media del índice de cono); Ic(Me)-(Mediana); Ic(mín)-(mínimo); Ic (máx)-(máximo); σ -(Desviación estándar poblacional); CV-(Coeficiente de variación); Ca-(Coeficiente de asimetría) y Cu-(coeficiente de Curtosis)

Al analizar el coeficiente de variación (CV) en la profundidad de 0 a 2.5 cm se puede observar que tiene un valor 239.5 % y esto es debido a que en esta profundidad los valores mínimos de 0.07 MPa y máximos de 3.58 MPa son bastantes distantes entre

sí y muestran la gran heterogeneidad en la resistencia a la penetración en el suelo, el coeficiente de asimetría tiene un comportamiento positivo (C_a) y su coeficiente de curtosis también tienen un comportamiento positivo por lo que se puede plantear que su curva es leptocúrtica y la concentración de datos alrededor de su media es de 11.69. Al aumentar la profundidad del I_c , va creciendo, hasta llegar a los 10.0 cm y en estas condiciones tanto el coeficiente de asimetría (C_a) y el coeficiente de curtosis siguen un comportamiento positivo, sin embargo en la profundidad de 10.0 a 12.5 cm, el coeficiente de curtosis es negativo por lo que sus datos alrededor de la media tienen una menor concentración o sea tienen una mayor dispersión como se puede observar en los valores de la desviación estándar del cuadro 2, pues la curva se comporta de forma platicúrtica. Y los datos obtenidos a partir de esta profundidad tienen un comportamiento negativo en el coeficiente de asimetría (C_a) por lo que hasta la profundidad de 17.5 cm el coeficiente de curtosis es negativo, lo que quiere decir que los datos están a la derecha (C_a) y representados por una curva platicúrtica. A partir de esta profundidad y hasta los 30.0 cm el coeficiente de asimetría es negativo y el coeficiente de curtosis es positivo, teniéndose una mayor concentración de datos alrededor de la media, lo que indica en esta profundidad muy pocas variaciones, como se puede observar en el cuadro 2, pues hasta los 12.5 cm de profundidad el coeficiente de variación (CV) es bastante alto. Como se indica anteriormente, a partir de los 12.5 cm y hasta los 30.0 cm de profundidad el coeficiente de asimetría tiene un comportamiento negativo y la curtosis valores positivos con excepción de la profundidad de 12.5 a 17.5 cm; es importante destacar que en estos dos rangos de profundidad se registra una aproximación a la curva normal, ya que tanto el

coeficiente de curtosis, como el de asimetría tienen valores bajos. Los valores máximos registrados en el $I_c(\text{máx})$ en las diferentes profundidades van desde 3.0 a 6.0 MPa, lo cual según investigadores en esta rama de la ciencia son muy dañinos para el crecimiento del sistema radical de las plantas a partir de 2.0 MPa (Nacci, 1991) y también por Micucci y Taboada (2006). Los valores mínimos encontrados fueron aumentando de 0.07 hasta 2.49 MPa, este último valor en la profundidad de 20.0 a 22.5 cm y los coeficientes de variación (CV) mostraron en los primeros 12.0 cm una gran variabilidad y fueron estabilizándose de esta profundidad en lo adelante hasta llegar a los 30.0 cm. Al realizar el análisis del índice de cono medio o promedio $I_c(\text{med})$, se observa que de 0.0 hasta los 10.0 cm de profundidad el máximo registrado es de 1.22 MPa, sin embargo a partir de esta profundidad y hasta los 30.0 cm los valores van en ascenso comenzando 2.16 MPa en la profundidad de 10.0 a 12.5 cm y llegando en la profundidad de 27.5 a 30.0 cm a los 5.84 MPa, siendo este índice de cono muy alto, lo cual es un limitante para el cultivo en cuanto a su crecimiento y desarrollo, como se ha planteado anteriormente, todos estos valores del $I_c(\text{med})$ en la labranza de preparación primaria de suelos con arado de discos fueron superiores a los planteados como críticos para el crecimiento de raíces, señalado por Botta, et al. (2004). Realizando una comparación con lo investigado por Materechera (2009), en suelos de África del Sur en cultivos de agricultura urbana y con labranza tradicional y en suelos de sabana semiáridos, utilizando tractores livianos de 56 kW y masa de 2536 kg, este investigador encontró que en cultivos de vegetales a una profundidad de 30 cm, el $I_c(\text{máx})$ fue de 2.31 MPa, en campo vinícola a 5.0 cm de profundidad fue de 1.58 MPa y en huerta tradicionales de 2.55 MPa a 20 cm de profundidad, sin

embargo los resultados obtenidos en el presente ensayo muestran valores muy diferentes de los índices de cono ($I_c(\text{med})$) y se tiene que para las profundidades de 20.0 y 30.0 cm, fueron mucho mayores llegando a 6.0 MPa y a la profundidad de 5.0 cm de 3.58 MPa, utilizándose tractores livianos y pesados en las diferentes tareas de preparación de suelo de forma tradicional. Es necesario señalar que en los datos mostrados en el cuadro 2, los valores bajos de los coeficientes de asimetría y curtosis corresponden a lo que predice la distribución normal y solo en las profundidades de 7.5 a 10.0 cm y de 17.5 a 20.0 cm cumplen con valores próximos a ± 0.5 , para que pueda ser considerada una aproximación a una curva normal. Al realizar una comparación con los experimentos realizado por Botta, et al. (2009) en la profundidad de 20.0 cm, en suelo argiudol con cinco pases del sistema de rodaje y en preparación de suelo tradicional en la república argentina, con un tractor pesado se registraron índice de cono de 1.0 MPa, muy inferior a lo registrado en el ensayo que se presenta, el cual en esta profundidad con ocho pasadas en suelo vertisol con tractores livianos y pesados, se registraron un $I_c(\text{mín})$ de 0.7 MPa y un $I_c(\text{máx})$ de 6.0 MPa, con una diferencia entre el máximo y el mínimo de 5.30 MPa y una media de 5.43 MPa, muy superior a lo registrado por estos investigadores para un mismo sistema de labranza y suelos diferentes.



Nota: Ic(med)-(media del índice de cono); Ic(Me)-(Mediana); Ic(mín)-(mínimo); Ic(máx)-(máximo)

Fig.1. Gráficas del comportamiento estadístico del índice de cono (medio, mínimo, máximo y la mediana) con preparación de suelo con arado de discos en la preparación primaria, después de la siembra del maíz en terreno vertisol, (2018-2019), Valle de Toluca.

En la figura 1, se muestra la estadística descriptiva del comportamiento del índice de cono medio (Ic(med)), el cual está bastante cercano al índice de cono de la mediana (Ic-Me) y a partir de los 20.0 cm de profundidad tienen un comportamiento idéntico al del índice de cono máximo (Ic(máx)) y como se puede observar el índice de cono mínimo (Ic(mín)), solo crece por encima de los 2.0 MPa a partir 20.0 cm de profundidad. El 58 % del Ic(med) está por encima de 2.0 MPa o sea a partir de los 10.0 cm de profundidad,

estas mediciones coinciden con lo investigado por Pérez (2010) en suelos vertisol en cultivos de caña de azúcar antes de la cosecha mecanizada.

El cuadro 3, muestra los resultados del índice cono registrado en la parcela en la que fue realizada la preparación primaria de suelos con multiarado, en la cual por las características de su trabajo en el que el corte que se realiza en el fondo del suelo es horizontal y sin inversión del prisma de suelo conlleva a una mejoría ostensible en la mullición del suelo y esta una de las razones para que en la profundidad de 0 a 2.5 cm muestre una caída en el índice de cono con respecto a la labor realizada con el arado de disco y que a su vez el coeficiente de variación (CV) sea de 157%, lo cual indica una menor dispersión de las mediciones observadas.

Cuadro 3. Estadística descriptiva del índice de cono (Ic) después de realizada la siembra de maíz, con multiarado en la preparación primaria del suelo vertisol, (2018-2019), Valle de Toluca.

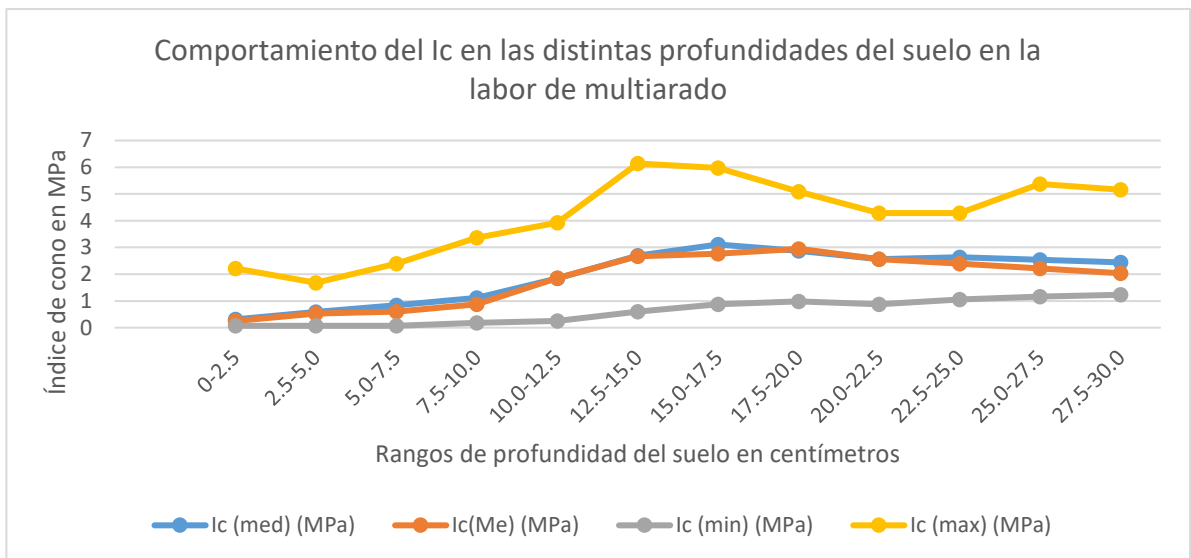
Profundidad (cm)	Ic (med) (MPa)	Ic(Me) (MPa)	Ic (min) (MPa)	Ic (max) (MPa)	σ	CV (%)	Ca	Cu
0-2.5	0.31	0.25	0.07	2.21	0.47	157.00	23.03	7.14
2.5-5.0	0.59	0.53	0.07	1.68	0.37	63.06	18.43	1.03
5.0-7.5	0.84	0.60	0.07	2.39	0.55	66.63	6.93	0.67
7.5-10.0	1.11	0.88	0.18	3.37	0.74	67.56	2.53	1.04
10-12.5	1.85	1.86	0.25	3.93	1.12	61.12	0.23	-
								0.91
12.5-15	2.69	2.67	0.60	6.14	1.26	47.15	0.29	0.47
15-17.5	3.11	2.77	0.88	5.97	1.32	42.53	0.24	-
								0.19
17.5-20	2.87	2.95	0.98	5.09	1.09	38.00	0.23	-
								0.43
20-22.5	2.56	2.56	0.88	4.28	0.77	30.12	0.03	-
								0.11
22.5-25	2.63	2.39	1.05	4.28	0.83	31.74	0.52	-
								0.75
25-27.5	2.54	2.21	1.16	5.37	1.11	42.24	0.73	0.05
27.5-30	2.44	2.04	1.23	5.16	1.05	43.21	0.75	-
								0.23

Ic (med) - (media del índice de cono); Ic(Me)-(Mediana); Ic(mín)-(mínimo); Ic(máx)-(máximo); σ - (desviación estándar poblacional); CV-(Coeficiente de variación); Ca-(Coeficiente de asimetría) y Cu-(coeficiente de Curtosis)

En este nivel de profundidad tanto el coeficiente de asimetría (Ca), como el de curtosis (Cu) son positivos y en este último su valor es de 7.14 alrededor de la media, siendo una curva leptocúrtica. Hasta la profundidad de 12.5 cm se considera que los coeficientes de variaciones (CV) son altos, aunque los mismos han descendido suavemente hasta 61.12 % y a partir de esta profundidad hasta los 30.0 cm descienden más bruscamente, debido a la mullición del suelo realizada por el multiarado y el bajo impacto que pudo ocasionar el pase de los tractores y máquinas agrícolas en las labores complementarias (cultivo, aplicación de fertilizantes, etc.). Los valores del Ic(máx) están por encima de lo permisible para un buen crecimiento del sistema radical de las plantas, sin embargo estos valores en Ic(med) no superan los 3.0 MPa y con la excepción de la profundidad de 15.0 a 17.5 cm. Los valores bajos que se presentan en el coeficiente de asimetría (Ca) y del coeficiente de curtosis, después de los 10.0 cm de profundidad se acercan a una distribución normal, no comportándose de esta manera en las profundidades de 0.0 a 10.0 cm, donde los valores del Ca y Cu son mucho más altos. Es importante señalar que después de los 10.0 cm de profundidad el coeficiente de curtosis se comporta negativa en un 75 % de los casos con una desviación estándar bastante alta, lo cual indica que los datos están bastante dispersos, pues sus valores van de 0.8 a 1.32 MPa.

El comportamiento de los índices de cono en la preparación primaria de suelos con multiarado se presenta en la figura 2 y la gráfica muestra que la mediana y la media del índice de cono, prácticamente tienen un comportamiento bastante parecido y es

mucho más homogéneo que en la gráfica presentada para la preparación primaria de suelos con el arado de discos, por lo que el suelo está más mullido y con un acondicionamiento óptimo. El $I_c(\text{máx})$ solo alcanzó los 6.0 MPa en la profundidad de 12.5 a 15.0 cm a diferencia de la preparación del suelo con el arado de discos donde el I_c como norma rondaba los 6.0 MPa en la profundidad antes mencionada y como es lógico esto afecta sobremanera el crecimiento radical de las plantas y por lo tanto el crecimiento y desarrollo es raquíutico y los rendimientos caen y está por encima de los límites marcados por Terminiello (2000), el cual marca un punto crítico por encima de 1.20 MPa.



Nota: $I_c(\text{med})$ -(media del índice de cono); $I_c(\text{Me})$ -(Mediana); $I_c(\text{mín})$ -(mínimo); $I_c(\text{máx})$ -(máximo)

Fig.2. Gráficas del comportamiento estadístico del índice de cono (medio, mínimo, máximo y la mediana) con preparación primaria de suelo con multiarado, después de la siembra del maíz en terreno vertisol, (2018-2019), Valle de Toluca.

También se observa en la gráfica que el $I_c(\text{mín})$ solamente sobrepasa el 1.0 MPa en la profundidad mayor de 22.5 hasta los 30.0 cm. Es destacable que con este método de labranza las mediciones después de la siembra, solo el 8% supera los 3.0 MPa de $I_c(\text{med})$ y el 58 % supera los 2.0 MPa, igual cifra que en el arado de discos, pero con la atenuante que en la preparación de suelos con multiarado, los valores aritméticos son ostensiblemente menores.

En la figura 3, se muestran el comportamiento de los coeficientes de variación (CV) después de realizada la siembra del maíz en la preparación de suelos con arado de discos y con multiarado, en esta gráfica se puede observar que el CV para la preparación de suelos con arado de discos muestra

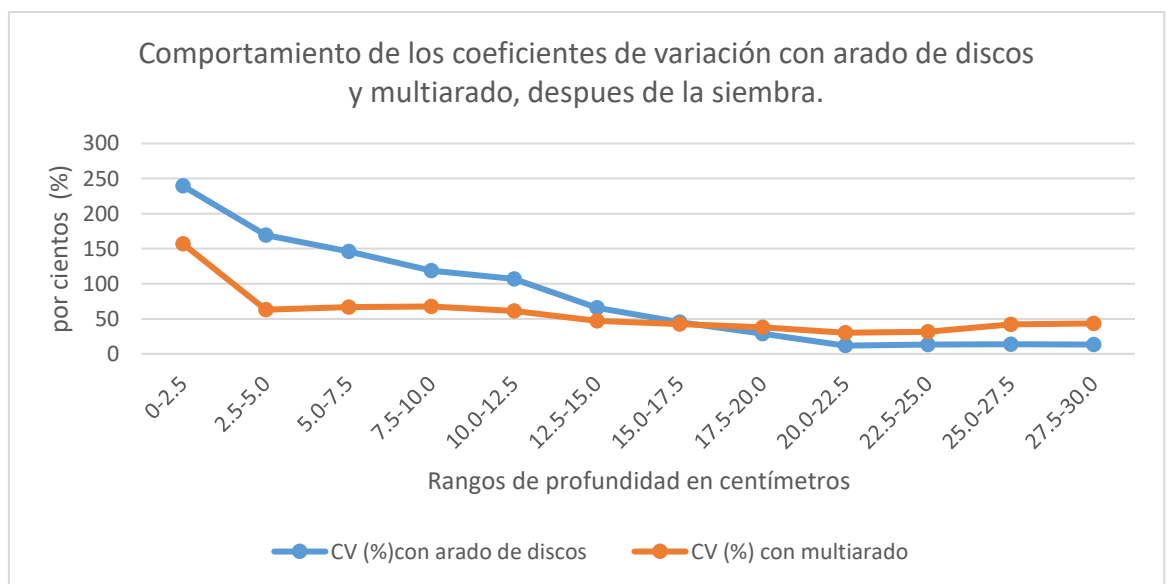


Fig.3. Comportamiento de los coeficientes de variación (CV) en las labores de preparación primaria de suelos con arado de discos y con multiarado, en terreno vertisol, (2018-2019), Valle de Toluca.

una gran variabilidad ($\approx 240\%$), mucho mayor que la detectada para lo realizado con el multiarado ($\approx 157\%$). Esto demuestra la ventaja de tener un suelo más mullido y menos disturbado en la preparación de suelos con el multiarado que con el arado de discos, ya que a su vez es más homogénea y aunque a partir de los 20.0 cm de profundidad tienen un comportamiento bastante parecido y decae numéricamente a partir de esta profundidad los valores se mantienen muy parecidos, hasta los 30.0 cm, por lo que estos valores son muy parecidos en suelo vertisol a lo investigado por Pérez (2010) y por Millan (2012), en mediciones tomadas después de la cosecha en la caña de azúcar en la parte oriental de la república de Cuba. En la figura 4, se presentan el comportamiento del $I_c(\text{med})$ después de la cosecha en ambas preparaciones primarias de suelo (arado y multiarado), en la gráfica se puede observar que los valores en la profundidad de 0.0 a 2.5 cm tienen un comportamiento parecido, sin embargo en la labor donde se utilizó el arado de discos, el $I_c(\text{med})$ crece aceleradamente hasta los 2.0 MPa y así se mantiene en todo el perfil del suelo hasta sobrepasar los 3.0 MPa en la profundidad de 22.5 a 25.0 cm, sin embargo en la preparación de suelos con el multiarado desde 0.0 cm hasta los 20.0 cm no sobrepasa el 1.5 MPa

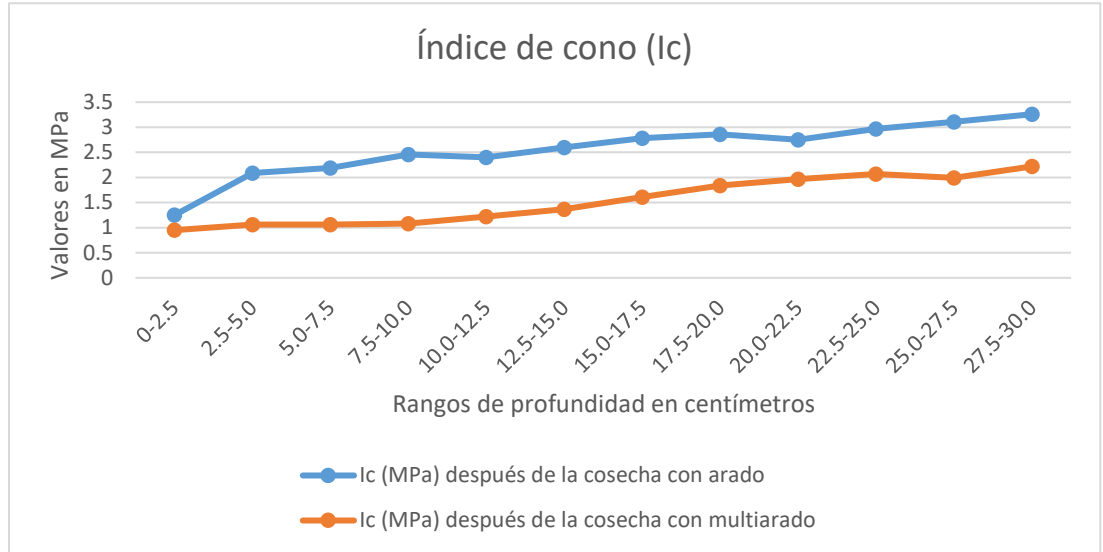


Fig.4. Comportamiento del índice de cono (Ic(med)) en las labores de preparación primaria de suelos vertisol después de la cosecha de maíz, con arado de discos y multiarado (2018-2019), Valle de Toluca.

y estas mediciones son la representación de la media de las diferentes observaciones realizadas en el campo después de la cosecha y estas no fueron mayores de 2.0 MPa de Ic(med), aun cuando en ello debe de influir la masa de la cosechadora. Como es lógico, estos valores indican la diferencia sustancial que existe entre las distintas preparaciones primarias de suelos utilizando un mismo tractor, aunque con implementos diferentes por la exigencia de la tecnología de preparación del suelo. Al realizar un análisis de la compactación en ambos sistemas de labranzas del suelo del presente ensayo, después de la profundidad de 10.0 cm, los Ic(med) superan el 1.0 MPa, llegando a los 6.0 MPa y según Kirkegaard (1990) el efecto de la dureza del suelo en la raíz daña el crecimiento de la misma en la mayoría de las especies y reduce el

crecimiento en un 50%, cuando el I_c se encuentra de 0.7 a 1.5 MPa y se limita completamente a valores mayores de 4.0 MPa.

CONCLUSIONES

En las preparaciones de suelos, en las que se utilizó el arado de discos y el multiarado, los valores del índice de cono medio ($I_c(\text{med})$) después de los 10.0 cm de profundidad y hasta los 30.0 cm sobrepasaron los 1.5 MPa, no obstante es necesario señalar que la preparación de suelos con multiarado es muy inferior numéricamente a la realizada con arado de discos, no obstante a ello el crecimiento radical de las plantas está muy limitado en su crecimiento por los I_c registrados después de los 10.0 cm de profundidad.

En los primeros 12.5 cm de profundidad en la preparación de suelos con arado de discos el $I_c(\text{med})$ tiene una gran variabilidad (CV) después de la siembra, pues su valor en los primeros 12.5 cm se mueve de 239.5 a 106.7 % y a partir de esta profundidad cae abruptamente y su $I_c(\text{med})$ es mayor en todo este horizonte a los 3.0 MPa.

La variabilidad (CV) mostrada en la preparación de suelos con multiarado a partir de los 2.5 cm es bastante homogénea hasta los 12.5 cm y a partir de esta profundidad sus valores son bastante parecidos, fluctuando de 47 a 30 %, lo cual muestra la ventaja de un suelo mullido y menos disturbado.

Los $I_c(\text{máx})$ con arado de discos en todo el perfil de suelo sobrepasan los 3.0 MPa, llegando a los 6.0 MPa a partir de los 7.5 cm, contrariamente a los mostrado con el uso del multiarado en el cual solo se alcanzó 6.0 MPa en la profundidad de 12.5 a 15.0 cm, en los demás perfiles estuvieron muy por debajo de este valor.

Los valores bajos que se presentan en los coeficientes de curtosis y de asimetría en la preparación de suelos con multiarado después de los 10.0 cm de profundidad, plantean una aproximación a la distribución normal, lo cual es de suma importancia para la realización de inferencias con este tipo de implemento.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de Maestría, a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, así como al personal que labora en la maquinaria agrícola de la facultad por las facilidades y el aprecio que siempre me brindaron.

BIBLIOGRAFÍA

1. ASABE. (2008). Standard S313.3: Soil Cone Penetrometer. ASABE, St. Joseph, MI.
2. Akker, J.J.H. and A. Canarache (2001). Two European concerted actions on subsoil compaction. *Landnutzung und Landentwicklung*. 42:15-22.
3. Bengough, A.G., C.E. Mullins (1990). Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. *J. Soil Sci.* 41, 341–358.
4. Botta, G.F., A. Tolon Becerra, F. Bellora Tourn (2009). Effect of the number of tractor passes on soil rut depth and compaction in two tillage regimes. *Soil and Tillage* 103(2009) 381-386.
5. Botta, G., D. Jorajuria, R. Balbuena, H. Rosatta (2004). Mechanical and cropping behavior of direct drilled soil under different traffic intensities: Effect and soybean (*Glicine max L*) yields. *Soil and tillage research*, 78, 53-58.
6. Canarache, A. (1991). Factors and indices regarding excessive compactness of agricultural soils. *Soil & Tillage Res.* 19, 145–164.
7. Carder, J. and J. Grasby (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.

8. Carter, L.M., B.D. Meek., and E.A. Rechel (1991). Zone production system for cotton, soil response. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*. 34:354-360.

9. Elbanna, E.B., B.D. Witney (1987). Cone penetration resistance equation as a function of the clay ratio, soil moisture content and specific weight. *J. Terramech*. 24 (1), 41–56.

10. Flowers, M. and R. Lal (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.

11. Gill, W.R. (1971). Economic assessment of soil compaction. ASAE Monograph. St. Joseph.

12. Hamza, M.A., W.K. Anderson (2005). Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes, and possible solutions. *Soil & Tillage Res*. 82, 121–145.

13. Kayombo, B. y R. Lal (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.

14. Kirkegaard, J.A. (1990). Effect of compaction on the growth of pigeonpe on clay soils. Ph.D. Thesis. University of Queensland, St. Lucia, Brisbane, Australia.

15. 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.

16. 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.

17. Lowery, B., R.T. Schuler (1994). Duration and effects of compaction on soil plant growth in Wisconsin. *Soil & Tillage Res*. 29, 205–210.

18. Materechera, S.A. (2009). Tillage and tractor traffic effects on soil compaction in horticultural fields used for peri-urban agriculture in a semi-arid environment of the North West Province, South Africa. *Soil and Tillage Research* 103 (2009) 11-15.

19. Micucci, F. y M. Taboada (2006). Soil physical properties and soybean (*Glicine max*, Merrill) root abundance in conventionally and zero tillage soil in the Pampas of Argentina. *Soil and Tillage Research* 86:152-162.
20. Millán, H., A. Tarquis., J. Mato., M. Gonzalez-Posada (2012). Spatial variability patters of some vertisol properties at a field scale using standardized data. *Soil and tillage research*. 120:p.76-84.
21. Nacci, S., S. Pla (1991). Estudio de la Resistencia a la penetración de los suelos con técnicas y equipos desarrollados en el país para evaluar propiedades físicas de los suelos. *Agronomía tropical*. 42(1-2):115-132.
22. Neve, S. and G. Hofman (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.
23. Ngunjiri, G.M.N., J.C. Siemens (1995). Wheel traffic effects on corn growth. *Trans. ASAE* 38, 691– 699.
24. 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. p.281-291.
25. Pérez, L., H. Millán., M. Gónzalez-Posada (2010). Spatial complexity of soil plow layer penetrometer resistance as influenced by sugar cane harvesting. A pre fractal approach. *Soil and tillage research*, 110:p.77-86.
26. 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.
27. Soil Science Society of America. (2013). *Glossary of Soil Science Terms*. Madison, WI, USA. 92 p.
28. Terminiello, A., J. Claverie., R. Balbuena (2000). Cone index evolution through the growth season of cabbage crop (*Brassica oleracea L*). *Proc 4° Cadir (Argentine Congress on Agricultural Engenieering I*, pág.68-73.
29. Voorhees, W.B. (1992). Wheel-induced soil physical limitations to root growth. *En: Hatfield, J.L., Stewart, B.A., (Editores), Limitations to Plant Root Growth. Advances in Soil Science*. Springer, New York, vol. 19, pp. 73-95.

EVALUACIÓN DE LA INTENSIDAD DEL TRÁFICO DE TRACTORES E
IMPLEMENTOS EN UN SUELO AGRÍCOLA

EVALUATION OF THE INTENSITY OF TRAFFIC OF TRACTORS AND
IMPLEMENTS IN AN AGRICULTURAL SOIL

**Enrique García Rodríguez¹, Francisco Gutiérrez-Rodríguez^{2§}, José Francisco Ramírez
Dávila², Andrés González-Huerta², Delfina de Jesús Pérez López², Rodolfo Serrato Cuevas²**

¹Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales-Universidad Autónoma del Estado de México.

*²Centro 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.

egarcia0105@hotmail.com³, framirez@uaemex.mx², agonzalez@uaemex.mx²,
seccum@yahoo.com.mx², djperez@uaemex.mx².

E-mail: autor para correspondencia - fgrfca@hotmail.com²⁸

RESUMEN

Con la finalidad de conocer la intensidad de las pasadas y su efecto sobre la compactación o índice de cono del conjunto máquina tractor durante el ciclo agrícola del maíz, en la tecnología de labranza convencional y mínima, se equipó a cada tractor con un receptor DGPS de señales al entrar al campo de cultivo, para monitorear el tránsito durante las diferentes actividades. Los datos registrados, se realizaban de forma automática con una frecuencia de 2 s. También se midieron el ancho de los neumáticos a través de la huella reflejada en el suelo con una presión de aire de 140 kPa. En labranza tradicional la aplicación de rastra cubrió el 134.38% de la superficie y en la labor de aradura el 91,15% y en total fue del 384.83% de la superficie. En la tecnología de labranza con el multiarado se cubrió un total de 36.95% de la superficie y al contabilizar todas las pasadas del tractor-implementos arrojó la cifra de 170.08%. Siendo ostensiblemente menor en esta tecnología que en la labranza con arado de discos. En lo referente a Índice de cono (Ic) en la labranza con arado de discos después de la siembra el Ic superó los 3.0 MPa después de la profundidad de 12.5 cm mientras que con multiarado en el 80% de los casos no superó esta cifra y así sucedió con el Ic después de la cosecha en ambos casos.

Palabras claves: Sistema de rodaje, tractores agrícolas, DGPS, multiarado.

SUMMARY

In order to know the intensity of the passes and their effect on the compaction or cone index of the tractor machine assembly during the agricultural cycle of corn, in conventional and minimum tillage technology, each tractor was equipped with a DGPS receiver of signals when entering the

cultivation field, to monitor the traffic during the different activities. The recorded data was performed automatically with a frequency of 2 s. The width of the tires was also measured through the footprint reflected on the ground with an air pressure of 140 kPa. In traditional tillage the application of dredge covered 134.38% of the surface and in the work of aradura 91.15% and in total it was 384.83% of the surface. In the tillage technology with the multi-plow, a total of 36.95% of the surface was covered and when counting all the passes of the tractor-implements, the figure was 170.08%. Being ostensibly lower in this technology than in tillage with disk plow. Regarding the Cone Index (I_c) in tillage with disc plow after sowing, the I_c exceeded 3.0 MPa after the depth of 12.5 cm while with multi-plowing in 80% of cases it did not exceed this figure and This happened with I_c after harvest in both cases.

Keywords: Tracking system, agricultural tractors, DGPS, multi-plow.

INTRODUCCIÓN

La ingeniería de suelos define a la compactación como, el proceso mediante el cual 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). Así también Botta et al. (2013) indica que en suelos densos o compactados se impide el crecimiento de las raíces y de este modo se limita el consumo de agua a la planta, lo que afecta su rendimiento al paso reiterado de las máquinas agrícolas. Según plantea Martiren et al. (2016), solo en Europa 33 000 000 ha de suelo arable se encuentra altamente degradado por el reiterado paso del sistema de rodaje de los tractores agrícolas. Por otro lado Cerisola et al. (2015), el gran desafío es el diagnóstico de la calidad de vida de los suelos para desarrollar un sistema productivo, basado en una agricultura sostenible y plantea que las mejores condiciones para el tráfico son

innegables, siempre que sean controlados, pues el tráfico trae como consecuencia modificaciones físicas que conducen a la compactación. Draghi et al. (2015) plantea que es notorio que el tráfico sobre suelo labrado provoca el 83 % del hundimiento final en la primera pasada. El tráfico posterior y hasta las diez pasadas provoca sólo el 17 % del hundimiento restante. En definitiva, la no labranza evidencia un suelo con mayor capacidad portante, pero sensible a la intensidad del tráfico, aún más que el suelo labrado.

La compactación del suelo también afecta a la mineralización del C y N de la materia orgánica del suelo y del rastrojo (Neve y Hofman, 2000), así como a la concentración del CO₂ en el suelo (Conlin y Driessche, 2000). 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). De acuerdo a lo planteado por Botta et al. (2016), la compactación del suelo es causada por la alta intensidad del tráfico y la presión de los neumáticos sobre el suelo del tractor y se combina en la cosecha, especialmente cuando estas operaciones se llevan a cabo en suelo húmedo o con neumáticos de alta presión sobre el suelo.

En la actualidad la compactación es considerada un problema medioambiental muy grave causado por prácticas tecnológicas en la agricultura convencional, es muy difícil localizarlo y racionalizarla, porque las marcas del sistema de rodaje de los tractores y las máquinas agrícolas en la superficie del suelo no son evidentes (McGarry, 2001). En ensayos realizados se ha utilizado un receptor GPS (sistema de posicionamiento global) como equipo simple el cual se coloca en un tractor y puede detectar las áreas en el campo donde aparecen las huellas del paso del sistema de

rodaje de las máquinas agrícolas durante el trabajo de esta. Richards (2000) utilizó el sistema de posicionamiento global basado en tractores para mapear todos los movimientos del vehículo dentro de un campo durante un ciclo agrícola. Es necesario destacar la naturaleza oculta de la degradación estructural del suelo (DES), la cual 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). En este sentido, debido a que la compactación del subsuelo es muy persistente y las posibilidades naturales o artificiales de su aflojamiento han resultado decepcionantes, la Unión Europea la ha reconocido como una forma severa de degradación del suelo (Akker y Canarache, 2001). Wild (1992), plantea que la compactación y consolidación del suelo, acompañada por la pérdida de los poros más grandes, es el resultado de la deformación y rotura bajo carga de los agregados del suelo y poros, que conduce a una pérdida de permeabilidad para el agua y las raíces. Con altos contenidos de agua, cuando el suelo usualmente se deforma fácilmente, puede darse poca compactación a menos que haya tiempo y oportunidad para que el agua escape. Así, con suelos húmedos bajo las cargas transitorias producidas por el tráfico y algunos aperos, puede haber encharcamiento, deformación, pérdidas de agregados y quizás algo de dispersión, pero poca pérdida de volumen de suelo, pero al secarse se vuelve intrínsecamente más fuerte, y la susceptibilidad a la compactación puede aumentar pues los poros más amplios, que se vacían primero, son relativamente débiles, pero con el aumento del secamiento adicional el aumento de la resistencia del suelo se hace predominante. 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). La dureza del suelo se usa como medida de la compactación porque refleja la resistencia del suelo a la penetración de raíces (Hamza y Anderson, 2005). 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, 2005). Bouwman y Arts (2000), sostienen que un ligero grado de compactación superficial puede ser benéfico para algunos tipos de suelo, indicando de manera interesante que existe un nivel óptimo de compactación para el crecimiento del cultivo. El concepto de nivel óptimo de compactación es importante, especialmente en sistemas de tránsito controlado, donde se evita cualquier fuente externa de compactación porque ésta podría causar un nivel de compactación menor al óptimo y decrementos en el rendimiento. Con la finalidad de evaluar el tránsito de los tractores por el campo de cultivo se eligieron dos métodos de labranza, con el objetivo de conocer la cantidad de veces que el sistema de rodaje de cada uno de los tractores en las diferentes actividades de preparación del suelo hace sus pasadas y en que magnitud es capaz de cubrir la superficie de la parcela objeto de investigación.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se realizó de abril 2018 a marzo 2019 en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicada a los 19° 23' 30" LN y 99° 41' 30" a una altitud de 2640,5 m.s.n.m. En el Campus Universitario la superficie total disponible es de 110 ha. La clasificación del suelo, de acuerdo USDA (2013), se encuentra en el orden vertisol, y dentro del subgrupo Entic pelluderts, con un contenido de arcilla superior al 30% hasta los 50 cm de profundidad, provocando la formación de grietas de más de 1 cm de anchura hasta una profundidad, de 50 cm. El terreno utilizado para el ensayo tenía cinco años sin utilización agrícola y los parámetros escogidos, fueron el mapeo de las pasadas del sistema de rodaje de los tractores registradas por medio de

receptor de señales de DGPS. Las tecnologías de preparación del suelo utilizadas fueron, la labranza convencional del suelo basada en el arado y con una superficie de 16.41 ha, así como labranza mínima o reducida, utilizando el multiarado con una superficie de 17.51 ha. Las características de los tractores y los implementos utilizados para las labores primarias y complementarias (siembra y cultivo) en ambas tecnologías, se muestran en el cuadro 1.

Cuadro 1. Características técnicas de los tractores empleados en el ensayo. Toluca, México, 2018-2019

Modelo del tractor	Masa del tractor (kg)	Medida de las ruedas traseras y delanteras (pulg.)	Presión media específica sobre el suelo rueda trasera (presión neumático 140kPa)	Presión media específica sobre el suelo rueda delantera (presión neumático 140kPa)
6603 John Deere (4X4) Neum. Radial	5872	18.4-34 14.9-24	249 kPa (ambas ruedas 499 kPa)	177 kPa (ambas ruedas 355 kPa)
5715 John Deere (4X4) Neum. Radial	2790.0	15.5-38 7.50-16	162 kPa (ambas ruedas 324 kPa)	90.5 kPa (ambas ruedas 181 kPa)

Los tractores utilizados fueron instrumentados con un receptor de señales DGPS modelo Oregon 650 Garmin, el cual enviaba una señal cada 2 s, la cual fue almacenada en el dispositivo de la memoria de medición y con estos datos se realizó el mapeo del tráfico. La intensidad del tráfico del conjunto tractor-implemento fue monitoreada en las dos tecnologías de labranza del suelo utilizadas. Es conocido que los contenidos de agua y de arcilla del suelo y las continuas pasadas de las máquinas agrícolas contribuir directamente a la compactación del suelo, por lo que estas influencias negativas también fueron observadas y medidas para su valoración y posterior

análisis. Todos los tractores utilizados estaban dotados con ruedas sencillas en los dos ejes. El mapeo de suelos fue realizado y los datos contabilizados con el programa MapSource.

En los trabajos de preparación de suelos, donde se realizaron los ensayos en cada una de las aplicaciones de cada tecnología, los tractores utilizados estaban dotados de lastre sólido y líquido en las ruedas motrices y este último hasta en un 75 % de su capacidad con agua, y aunque es sabido que esto aumenta del 5 al 10 % el consumo de combustible por unidad de suelo elaborada también disminuye el patinaje de las ruedas motrices y aumenta la compactación del suelo. No obstante, se debe plantear que bajo estas condiciones de diseño se trabajan tradicionalmente los tractores para accionar las máquinas agrícolas en cada ciclo agrícola y bajo dichas condiciones se realizaron los experimentos. Se realizaron muestreos de suelo donde la densidad aparente del suelo arrojó un promedio de $1.43 \text{ Mg}\cdot\text{m}^{-3}$ y el índice de cono (I_c) no pudo ser medido pues en la capa de 0 a 10cm de profundidad fue de más de 7.0 MPa, superando lo que podía medir el compactómetro y en las profundidades mayores de 10.0 cm fue de 6.0 MPa como promedio. Durante el ensayo el I_c se determinó con el uso de un penetrómetro Scout 900 S313 (ASAE Standards S313.2, 1993)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el cuadro 2 se muestran los diferentes trabajos realizados con el conjunto tractor-máquina en la tecnología de labranza tradicional, los cuales fueron de ocho pasadas con los diferentes implementos y con diferentes tractores en los trabajos mecanizados. El ancho real de las ruedas motrices que se tomaron en cuenta fue de 0.86 m (ambas 1.72 m), y después de contabilizar el número de pasadas por la parcela del tractor con el implemento, la superficie cubierta fue de 6.03 ha, equivalente al 36.7% de cubrimiento de la superficie de cultivo por el sistema de rodaje del tractor y de esta manera se pasó tres veces la rastra lo cual conllevó a una superficie total de 22.06 ha, equivalente al 134.4% del total de la superficie removida.

Cuadro 2. Frecuencia de tránsito dado en porcentaje, en la parcela con tecnología de labranza convencional. Toluca, México, 2018-2019

Tipos de implementos	Ancho del Implemento (m)	Ancho de la rueda trasera del tractor (m)	Superficie cubierta en (ha)	Frecuencia de tráfico (%)
Primera rastra (tractor 6603)	3.00	0.41 (ambas 0.82)	6.02	36.7*
Segunda rastra (tractor 6603)	3.00	0.41(0.82)*	6.17	37.6*
Tercera rastra (tractor 6603)	3.00	0.41(0.82)*	9.85	60.0*
arado de disco (tractor 5715)	1.02	0.47(0.94)*	14.96	91.1
Cuarta rastra (tractor 6603)	3.00	0.41(0.82)*	11.73	71.5
Siembra (tractor 6603)	3.20	0.41(0.82)*	4.41	26.9
1ra escarda (tractor 5715)	2.40	0.47(0.94)*	5.33	32.5
2da escarda(tractor 5715)	2.40	0.47(0.94)*	4.66	28.4
Total			63.17	384.9

*ancho de ambas ruedas traseras del tractor utilizado

En el Cuadro 2 se ponen las diferentes labores que se realizaron en orden cronológico durante el trabajo que se llevó a efecto en el campo durante la preparación primaria y complementaria del suelo, se pasaron por el campo tres veces la rastra lo cual se realizó en función de destruir los alomados producidos por el cultivo de las plantas de maíz en años anteriores y dejarlos lo más llano posible para que pudiera trabajar el arado de discos en las condiciones más óptimas posibles. En la segunda pasada de rastra se cubrió un 37,6% de la superficie y en la tercera pasada de rastra se cubrió un 60 % y en esta última a veces se volvía a pasar casi por la misma huella anterior dejada por el sistema de rodaje del tractor y no hubo traslapo, por lo que pudo ser contabilizada y calculada la superficie dejada por el sistema de rodaje del tractor y registrada por el DGPS y esta última llegó a ser de un 60,0 %. Es importante señalar que todas las líneas registradas por el DGPS en todos los casos fueron evaluadas de la misma manera para las dos tecnologías de

preparación de suelos, sin excluir ninguna operación por básica que fuese. Es importante señalar que las tres primeras operaciones de rastra y que aparecen con un asterisco, no son parte tradicional de esta tecnología de preparación de suelos, pero es muy utilizada cuando los suelos vertisoles en la zona del valle de Toluca se dejan de cultivar por espacio de uno o más ciclos agrícolas, ya que los mismos pueden alcanzar en la capa arable resistencia a la penetración que puede sobre pasar los 5.0 MPa, o sea; que estas operaciones no son normales o recurrentes en esta tecnología, y que su aplicación depende del uso anterior del suelo. En la labor de aradura se puede observar que el arado tuvo un ancho de corte bastante pequeño (1.02 m), lo cual aumentó ostensiblemente el número de pasadas del conjunto máquina-tractor sobre la superficie de labranza y al contabilizarlas en el mapa, el tránsito del sistema de rodaje del tractor sobre el suelo fue del 91.1 %, lo que seguramente originó una gran compactación, lo cual es coincidente con algunos investigadores (Tullberg et al., 2007; Tullberg. 2010).

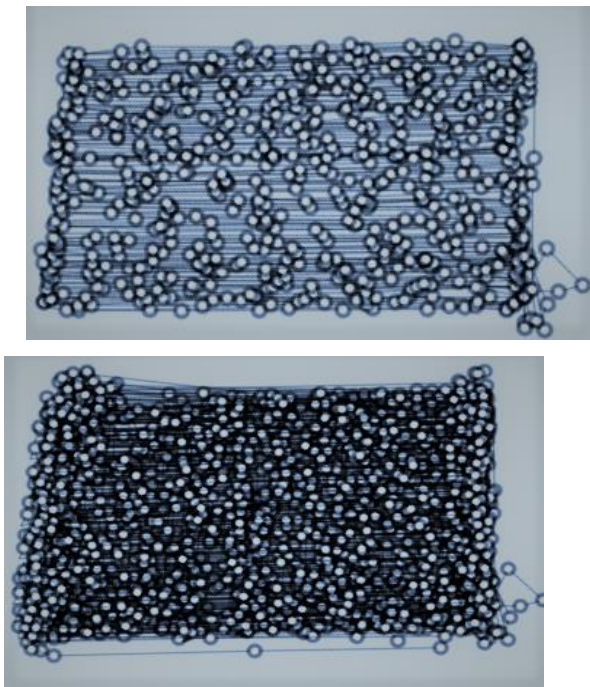


Figura. 1. Representación gráfica del tránsito de los tractores y la maquinaria agrícola para la tecnología convencional de labranza de suelo en 1.64 ha. Izquierda: recorrido del tractor con arado

de discos y en la derecha trayectorias de movimiento en el campo durante el ciclo completo de cultivo del maíz. Toluca, México, 2018-2019

En la figura 1 (izquierda) se observa la cantidad de pasadas que se realizaron con el arado y en la cual el conjunto tractor -implemento se desplaza de forma paralela en cada una de las pasadas y no existen puntos de concordancia, pero existe una gran densidad de los mismos, pues cada 1.02 m tiene que pasarse el implemento para poder remover toda la superficie de suelo en esta tecnología. En el Cuadro 2, se puede apreciar que se utilizó la rastra posterior a la labor de aradura, en función de buscar un buen mullido o destrucción de todos los terrones del suelo, lo cual ocasiono que el sistema de rodaje del tractor transitara de nuevo por la superficie en elaboración un 71,5 %, lo cual es altamente destructivo para la estructura físico mecánica del suelo, así como un aumento en la densidad aparente y una disminución en la productividad del suelo, lo cual es coincidente con lo planteado por Laureda et al. (2016). En la figura 1 (derecha) se puede observar la densidad de las pasadas en toda la superficie elaborada en esta tecnología, donde no existe un punto donde no hayan pasado las ruedas del tractor y donde se tienen alrededor de 500 puntos de concordancia y en número de dos repeticiones por lo menos y hasta cinco en el mismo punto como máximo, en esta figura se sobre pusieron los ocho mapas que se obtuvieron de las diferentes operaciones tecnológicas de preparación del suelo. En las últimas cinco operaciones mecanizadas (Cuadro 2) se transitó por encima de la superficie en la preparación del suelo un total de 250,3 %, lo cual es un valor apreciable, máxime si se tiene en cuenta que es un suelo vertisol, que es de los más compactos y con mucha susceptibilidad al aumento de la densidad aparente al paso del sistema de rodaje de los tractores en las diferentes labores mecanizadas. Es importante hacer notar los resultados del cálculo de la superficie cubierta por el sistema de rodaje mostrado en el Cuadro 2 y de acuerdo a lo planteado por Hamza y Anderson (2005), la labranza convencional fue evaluada por estos investigadores como la más dañina de las tecnologías de las preparaciones de suelo y en el caso de esta investigación la concentración observada en la figura 1 (derecha) las

pasadas reiteradas del sistema de rodaje de los tractores es una de las desventajas más importantes, fundamentalmente en suelos vertisoles.

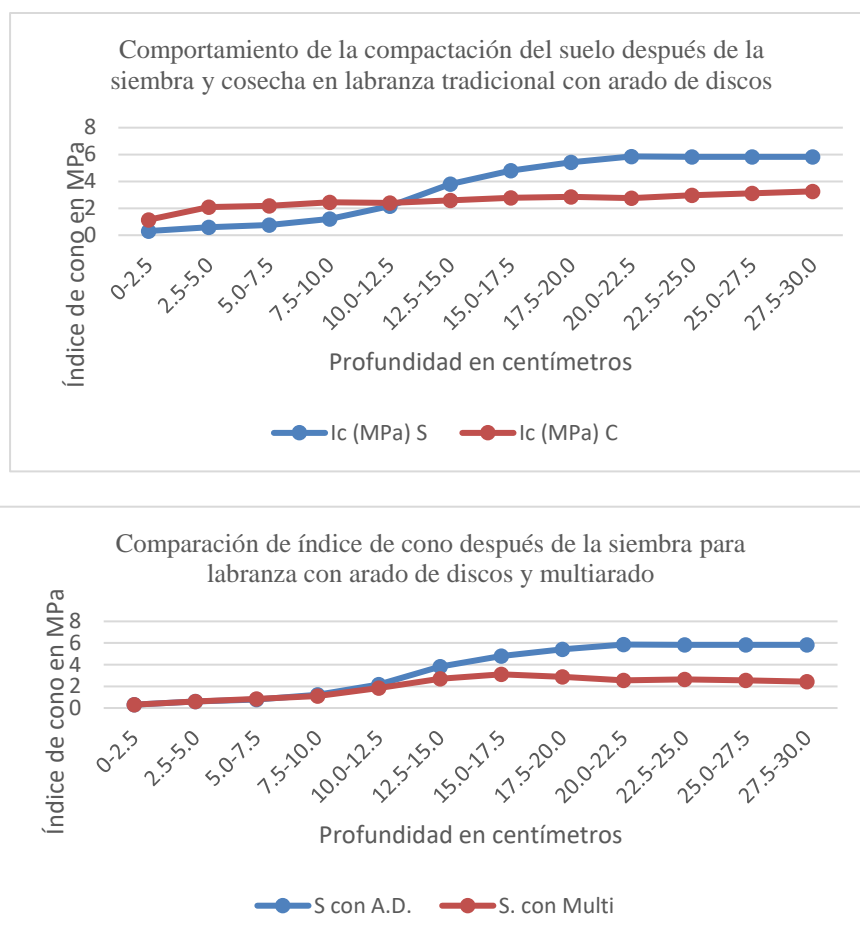


Figura 2. Comportamiento del índice de cono en las diferentes labranzas. a) Ic después de la siembra y cosecha con preparación de suelo con arado de discos, b) comparación del Ic después de la siembra para ambas preparaciones del suelo. S-siembra y C-cosecha. Toluca, México, 2018-2019.

En la figura 2a se presenta el comportamiento del Ic después de la siembra del maíz con la preparación del suelo con arado de discos, es necesario plantear que antes de aplicar el arado de discos se aplicó por tres veces la rastra de discos para destruir los camellones que quedaron cinco años atrás y hasta los 10.0 cm de profundidad el Ic fue de 1.22 MPa y densidad aparente (DA) de 1.21 Mg·m⁻³ y a partir de los 12.5 cm fue de 2.16 MPa, donde el sistema radical de las plantas no

alcanza un buen crecimiento y llegando alcanzar a los 30.0 cm un I_c de 5.84 MPa y DA de 1.21 $Mg\ m^{-3}$, lo cual es coincidente con lo planteado por Botta et al. 2013, donde también indica que en suelos extremadamente densos el crecimiento de las raíces se limita, así como también el consumo de agua a la planta y por ende afecta el rendimiento. En las mediciones realizadas del I_c pos cosecha siempre estuvo por encima de 1.25 MPa y a partir de los 5.0 cm de profundidad siempre estuvo por encima de los 2.09 MPa, llegando hasta los 3.26 MPa en los 30.0 cm de profundidad, pero siempre por debajo del I_c registrado pos siembra, es importante plantear que la DA en los diferentes perfiles fue de 1.17 a 1.2 $Mg\cdot m^{-3}$. En la figura 2b se presenta un estado comparativo del I_c pos siembra (S) en ambas preparaciones de suelo y se observa que la preparación de suelos con multiarado siempre estuvo por debajo de los 2.0 MPa hasta los 22.5 cm, con DA de 1.17 a 1.22 $Mg\ m^{-3}$, de esto se deduce que reiteradas pasadas en el suelo de cultivo es suficiente para incrementar el I_c en las capas superficiales y subsuperficiales, como bien lo plantea Botta et al. 2018.

En lo referente a la tecnología de labranza utilizando el multiarado AS-250, el comportamiento fue un tanto diferente, ya que la situación se comportó mejor en cuanto a la cantidad de pasadas del sistema de rodaje de los tractores en las diferentes operaciones de preparación del suelo, debido a que solamente se realizaron cinco operaciones mecanizadas en el ciclo agrícola (Cuadro 3) y que al pasar el multiarado con el tractor John Deere 6603 solamente se cubrió un 36,9 % de la superficie que se tenía que elaborar (Figura 3).

Cuadro 3. Frecuencia tráfico, en la parcela con tecnología de labranza con multiarado. Toluca, México, 2018-2019

Tipo de implemento	Ancho de implemento (m)	Ancho de la rueda trasera del tractor (m)	Superficie cubierta por tránsito de sistema de rodaje (ha)	Frecuencia de tráfico (%)
Multiarado	2.40	0.41(0.82)*	6.47	36.9
Rastra (dos pasadas)	3.00	0.41(0.82)*	11.76	67.2
Siembra	3.20	0.41(0.82)*	4.70	26.9

Ira escarda	2.40	0.47(0.94)*	6.84	39.1
Total			29.78	170.1

*ancho de ambas ruedas traseras del tractor utilizado

De la superficie que se tenía que elaborar se puede constatar en la figura 2 (izquierda) la forma en la cual quedo registrada con el DGPS el tránsito del conjunto tractor-multiarado, el cual teniendo un ancho real entre ambas ruedas motrices de 1.72 m y con lo cual se cubrió una superficie de 6.47 ha

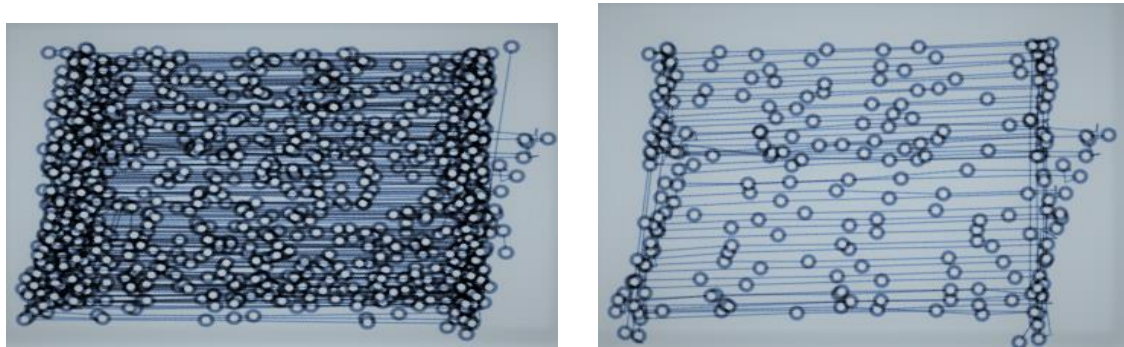


Figura. 3. Representación gráfica del tránsito del tractor y para la tecnología de labranza mínima con multiarado en una superficie de 1.75 ha. Izquierda: recorrido del tractor con multiarado y en la derecha trayectorias de movimiento en el campo durante el ciclo completo de cultivo del maíz. Toluca, México, 2018-2019

Después de elaborar el suelo con multiarado fue necesario aplicar dos pasadas de rastra con el mismo tractor, para destruir los grades terrones que produjo este implemento y esto conllevó a que se cubriera la superficie del suelo de cultivo en un 67.2 % y como es de observarse en una menor cuantía que lo realizado en la labranza tradicional. En esta tecnología antes de la siembra se cubrió una superficie con el sistema de rodaje de 104.1 % y al realizar un estudio comparativo con lo investigado por Kroulik et al. (2009), se puede plantear que se acerca bastante a lo realizado, aunque todas las máquinas agrícolas utilizadas por este investigador tienen anchos de

labor 6,0 a 36,0 m. Los resultados analizados son ostensiblemente mejores que los obtenidos en la labranza convencional. Al utilizar una sembradora de cuatro cuerpos u órganos de trabajo (2,40 m), la misma estuvo acoplada a un tractor John Deere 6603 con fórmula 4X4 y el área cubierta por las huellas de las ruedas del tractor tuvo una significación de 26.9 %, prácticamente la misma cantidad que en la labranza tradicional, sin embargo al compararla con las pruebas realizadas con lo realizado por Kroulik et al. 2009, el área cubierta en el experimento realizado fue 5.1 % mayor, ya que la sembradora utilizada en la república Checa es de 8.0 m de ancho, lo que da la posibilidad de tener un menor daño en la estructura al suelo y principalmente en la compactación. La superficie cubierta por las huellas del sistema de rodaje de los tractores utilizados en esta tecnología sumó el 170.1 %. En esta tecnología prácticamente todas las labores realizadas tienen un alto cubrimiento por las huellas de las ruedas de los tractores y en este caso Li Hong Wen *et al.* (2000), plantea que, a pesar de que las huellas de la rodada pueden ocupar un 20% del terreno, las pérdidas en esta área pueden ser compensadas por un rendimiento más alto del cultivo. Al comparar la figura 1 con la figura 3, se puede observar que en la labranza tradicional la superficie afectada por el paso de los tractores es ampliamente superada en comparación con la tecnología de labranza mínima. En base a los datos y al estudio realizado se puede plantear 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). Sin embargo Tullberg et al. (2007) planteó que considerando algunas combinaciones de neumáticos con los tractores utilizados, así como teniendo en cuenta las características tractivas de estos tractores, el área del campo de cultivo afectada por el tráfico del sistema de rodaje suele estar en el rango de 20 a 35%

para el tráfico controlado, pero el caso de particular de la agricultura mexicana es que la inmensa mayoría de los implementos agrícolas utilizados son de un ancho de labor pequeño y esto es uno de los grandes problemas que puede presentar el estar dañando constantemente el suelo por donde se transita, lo cual hace que se restrinja la cantidad de poros en el suelo y se registre un aumento de la compactación del suelo que pueda llegar a afectar el rendimiento de los cultivos. Como se puede observar en los ensayos de campo realizados, la superficie cubierta por las huellas de los sistemas de rodaje de los tractores rebaza por mucho lo planteado por otros investigadores y 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).

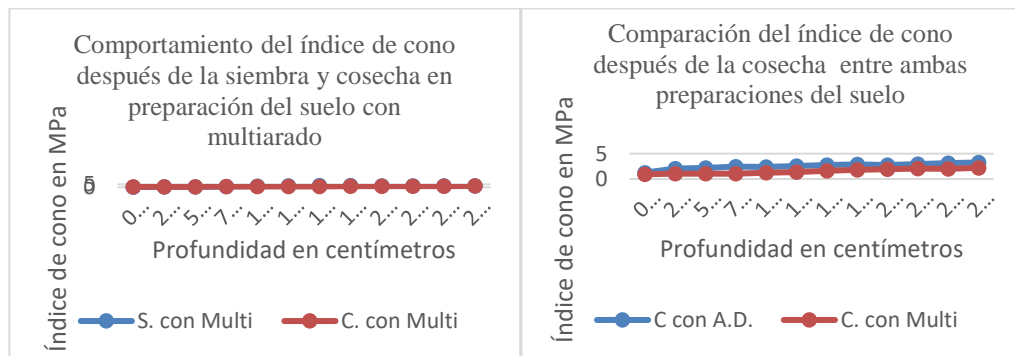


Figura 4. Comportamiento del índice de cono en las diferentes labranzas. a) Ic después de la siembra y cosecha con preparación de suelo con multiarado, b) comparación del Ic después de la cosecha para ambas preparaciones del suelo. S-siembra y C-cosecha. Toluca, México, 2018-2019.

En la figura 4a, se presenta el comportamiento del Ic durante la siembra (S con multiarado) y después de la cosecha (C con multiarado) y en el perfil de 12.5 cm de profundidad el Ic en la siembra estuvo por encima de los 2.0 MPa y contrariamente a esto en la cosecha el Ic con la excepción de 30.0 cm sobrepasó los 2.0 MPa lo cual puede haberse debido a la preparación complementaria del suelo, como es la escarda, por otro lado González-Cueto 2009, plantea que la presión de los neumáticos muestran un incremento en la

compactación a medida que aumenta la presión de inflado, no obstante a ello en el ensayo se mantuvo la presión en los neumáticos y el comportamiento coincide con lo planteado por este investigador y también es el criterio de Botta et al. 2012, tanto en la capa superficial como en las profundidades de aproximadamente 30 cm. En la figura 4b, se presentan los comportamientos del I_c después de la cosecha en ambas preparaciones de suelo, donde se puede notar que los valores del I_c después de la cosecha en la preparación de suelo con multiarado es inferior a lo mostrado donde se utilizó el arado de discos, donde este último llega a sobrepasar los 2.0 MPa en prácticamente todo el perfil del suelo no siendo este el comportamiento donde se utilizó el multiarado, es importante señalar que el pase reiterado es una de las condiciones preponderantes para que exista una gran compactación, independientemente de haberse utilizado en ambos casos neumáticos radiales, en los rangos de profundidad mayores de 20.0 cm los valores del I_c tiende a crecer coincidiendo con lo encontrado por Martiren et al. 2016.

CONCLUSIONES

En la tecnología de labranza tradicional se pasaron cuatro veces la rastra lo que sumó de un 205.8% de tránsito del sistema de rodaje del tractor, prácticamente dos veces la superficie que se estaba elaborando, lo cual influyó de forma negativa en la compactación del suelo, sin embargo en la labranza con utilización del multiarado, solo se transitó un 67.2 %. Al realizar la roturación del suelo con arado de discos se transitó un 91.1 % contra 36.9 % del multiarado, lo que en esta última conlleva a un ahorro de combustible y un menor daño a la estructura físico mecánica del suelo. El tránsito del conjunto máquina tractor total en la labranza con arado de discos durante todo el ciclo agrícola fue de 384.9 %, prácticamente cuatro veces de la superficie cultivada y en la

labranza con multiarado, fue de 170.1 %. En estos últimos valores mostrados se deduce que la labranza donde se utiliza el multiarado tiene ventajas, en rapidez de la preparación del suelo, menores gastos en combustible, mantenimiento del conjunto máquina tractor y daños al suelo, pues ello altera mínimamente la densidad aparente, los micro poros del suelo y la compactación. Por lo mostrado en las mediciones del Ic, la preparación primaria con multiarado en los primeros 25.0 cm de profundidad nunca supero 3.0 MPa, caso contrario a la preparación de suelo con arado de discos, la cual supero los 5.5 MPa y también se observó la ventaja del multiarado después de la cosecha donde los registros del Ic fueron menores con la utilización del multiarado.

Agradecimiento: Se le agradece a la Universidad Autónoma del Estado de México, Estados Unidos Mexicanos, con el apoyo del proyecto 4792/2019CIB y al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para la realización de los estudios de Maestría, a la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, así como al personal que labora en la maquinaria agrícola de la facultad por las facilidades y el aprecio que siempre me brindaron.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akker, J.J.H. y A. Canarache (2001) Two European concerted actions on subsoil compaction. *Landnutzung und Landentwicklung*. 42:15-22.

Botta, G.F., A.Tolón-Becerra, M.Tourn, X. Lastra-Bravo, D. Rivera (2012) Agricultural traffic: Motion resistance and soil Compaction in relation to tractor desing and different soil conditions. *Soil and Tillage Research*: 120(2012):92-98.

- Bouwman, L.A. y W.B.M. Arts (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., J.E. Mcphee, D.J. Reid (1995) Controlled traffic to increase productivity of irrigated row crops in the semi-arid tropic. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, v.35, p.503-513.
- Cerisola, C., L. Draghi, D. Jorajuría-Collazo (2014) Compactación en siembra directa. Consecuencias del tránsito durante la operación de siembra sobre la pérdida de porosidad libre al aire del suelo. *Rev. De la Facultad de Agronomía, La Plata*. Vol. 113(2):123-133.
- Conlin, T.S.S. y R. Driessche (2000) Response of soil CO₂ and O₂ concentrations to forest soil compaction at the long-term soil productivity sites in central British Columbia. *Canadian Journal of Soil Science*. 80:625-632.
- Draghi, L., D. Jorajuría-Collazo, D. Sarena, M. Bailleres, E. Melani, J.M. Castillo, C. Cerisola, T. Palancar (2015) Impacto del tránsito de dos sistemas de siembra. *Agrociencia Uruguay*. Vol.19(2). Montevideo
- González, O., C. Iglesias-Coronel, M. Herrera (2009) Análisis de los factores que provocan compactación del suelo agrícola. *Ciencias Técnicas Agropecuarias, Cuba*. V. 18(2):57-63.

- Hamza, M.A., W.K. Anderson (2005) Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Tillage Research*. 82(2005):121-145.
- Håkansson, I., J. Lipiec 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.
- Laureda, D.A., G.F. Botta, A. Tolón-Becerra, H.G. Rosatto (2016) Compactación del suelo inducida por la maquinaria en campos de polo en Argentina. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNCUYO, Mendoza*. Vol. 48(1):79-99.
- Li, H.W., H.W. Gao, J.D. Chen, W.Y. Li, R.X. Li (2000) Study on controlled traffic eith conservative tillage. *Transactions of the chinise society of agricultural Engeneering* 16. 73-77
- Kroulik, M., F. Kumhála, J. Húls, I. Honzik (2009) The evaluation of agrcultural machines field trafficking intensity for different soil tillage tecnologies. *Soil and Tillage. Research* 105. 171-175 pp.
- Neve, S. y G. Hofman (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.
- Martiren, V.S., R.A. Fonterosa, X.B. Lastra-Bravo, G.F. Botta (2016) Compactación por el tráfico de la maquinaria agrícola: su efecto sobre el esfuerzo cortante del suelo y el rendimiento del cultivo de maíz (*Zea mayz* L.). *Revista Siembra* 3:021-036.

- McGarry, D., L. García-Torres, J. Benítez, A. Martínez-Vilela (2001) Tillage and soil compaction. *In: First World Congress on Conservation Agriculture*. (eds.). 1-5 October 2001. Natural Resource Sciences. Madrid, Spain. 281-291 pp
- Richard, S.T. (2000) Development of a sistema for mapping the performance of agricultural field operations. Engd Thesis, unpublished Granfield University at Silsoe, Bedford, UK.
- Tullberg, J. (1990) Why control field traffic?. *In: Proceedings of Queensland Department of primary industries Soil Compaction Workshop, Toowoomba Australia*, pp.41-62.
- Tullberg, J.N., D.Y. Yule, D. McGarry (2007) Controlled traffic farming – from research to adoption in Australia. *Soil and Tillage Research* 97 (2), 272-281.
- Tullberg, J. (2010) Tillage, traffic and sustainability – A challenge for ISTRO *Soil and Tillage Research* 111 26-32.
- Soil Science Society of America. (2013) *Glossary of Soil Science Terms*. Madison, WI, USA. 92 p.
- Wild, A. (1992) *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Ediciones Mundi Prensa. Pp.1025.