

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

División de Ingeniería



**Disminución del riesgo de compactación de suelos agrícolas por
inadecuado manejo de maquinaria en Coahuila.**

Por:

Iván de Jesús Méndez Aguilar

Tesis:

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico Agrícola

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Marzo del 2004

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Disminución del riesgo de compactación de suelos agrícolas por inadecuado
manejo de maquinaria en Coahuila.

Por:

Iván de Jesús Méndez Aguilar

Tesis

Que se somete a consideración del H. Jurado Examinador como requisito
parcial para obtener el título de:

INGENIERO MECANICO AGRICOLA

Aprobado por el Comité de Tesis

Asesor principal

Dr. Martín Cadena Zapata

Sinodal

Sinodal

M.C. Tomás Gaytán Muñiz.

Ing. B. Elizabeth de la Peña Casas.

Coordinador de la división de Ingeniería

M.C. Luis E. Ramírez Ramos

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Marzo del 2004.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por haberme dado la dicha de darme la vida y me haya permitido terminar una etapa más de mi vida.

A mi **ALMA TERRA MATER**, por abrirme sus puertas y haber podido terminar mis estudios profesionales.

Al **Dr. Martín Cadena Zapata**: por brindarme su apoyo y confianza para la realización de este trabajo de investigación, por sus palabras de aliento y motivación de seguir adelante, por eso y mucho más gracias Dr. Martín siempre le estaré agradecido.

Al **M.C Tomás Gaytán Muñiz**: Por la asesoría brindada durante el desarrollo de este trabajo.

A los Ingenieros del departamento de Maquinaria Agrícola, es especial al **M.C Hector Uriel, M.C Juan A. Guerrero, Ing. Juan Arredondo Valdez**, por sus consejos, apoyo y confianza que me han brindado durante todo este tiempo.

Al **Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COECYT)**, por la oportunidad y el apoyo económico que me dieron para la elaboración de este trabajo.

A mis compañeros de la generación XCVI, **Nadia, Lupita, José M. Gallegos, Juan José, Kennedy Mendoza, Miguel A. Chan, Francisco, Eddi Balan, José Alfredo, Miguel A. Márquez, Ángel Mendoza, Miguel A. Ramírez, Octavio, Carlos A. Ramírez, Juan C. Gómez, Orlando, Anacleto, Víctor H. Zetina, Héctor Espejel**.

A mis amigos: **Juan Carlos, Juan J., Fernando, José Luis, Iván F., Miguel Gómez, Flavio, José Miguel**, gracias por todos los momentos buenos o malos que hemos pasado juntos.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a toda mi familia que dios me dio y que siempre creyeron en mi.

A mis padres: **José A. Martínez López y Lorena Aguilar de Martínez** por creer siempre en mí.

A ti papa: quien eres una gran persona a quien admiro y respeto, porque siempre me has apoyado en todos los momentos de mi vida, le doy gracias a dios por tener un padre como tu.

A ti mama: porque eres la mujer más hermosa de mi vida, del cual me siento orgulloso de que seas mi madre, gracias por todos tus esfuerzos, sacrificios, desvelos, cariños, consejos y mucho más ya que con nada podré pagarte todo lo que has hecho por mí.

A mis abuelitos:

Isabel Martínez, Rosario López (+)

Fidelino Aguilar, Amelia Aguilar

A quienes quiero mucho porque siempre me han brindado todo su apoyo y enseñado que en la vida con voluntad y decisión todo se puede.

A mis hermanos: Víctor Hugo y Sergio Arturo, por ese inmenso cariño que nos une, por todo el apoyo y confianza que me han brindado, los quiero mucho.

A mis primos y primas: Iris, Natali, Liliana, Fernando, Jorge, Luis, Alex, Cesar, Karla, a quienes quiero y estimo mucho.

A mis tíos y tías: por todo el apoyo, los consejos que me han dado en todo este tiempo, gracias por todo tíos.

INDICE DE CONTENIDO

Página

RESUMEN

I. INTRODUCCION.....	1
1.1. Problema de la compactación.....	1
1.1.1. El problema de la compactación en general.....	2
1.1.2. El problema de la compactación en México.....	2
1.1.3. El problema de la compactación en el Estado de Coahuila.....	3
1.2. Objetivos e Hipótesis.....	4
II REVISION DE LITERATURA.....	5
2.1 Que es la compactación y que problemas ocasiona.....	5
2.2 Mecánica de suelos.....	5
2.2.1 Propiedades mecánicas de los suelos agrícolas.....	5
2.2.2 Propiedades físicas del suelo.....	6
2.3 Origen de la compactación.....	11
2.4 Causa que se relacionan con la compactación de los suelos agrícolas.....	12
2.4.1 Maquinaria.....	12
2.4.2 Implemento.....	12
2.4.2 Suelo.....	13
2.5 Efectos de la compactación en los suelos agrícolas.....	13
2.6 Dificultad para la penetración de las raíces.....	14
2.7 Impacto de la compactación.....	15
2.8 Magnitud de la compactación.....	16
2.9 Medidas correctivas.....	16
2.10 Costo de la compactación.....	17
2.11 Factores a considerar por la compactación con maquinaria.....	18
2.11.1 Lo que debe pesar un tractor.....	18
2.11.2 Neumáticos agrícolas.....	19
2.11.3 Carga sobre los neumáticos.....	21
2.11.4 Marcado del neumático y capacidad de carga.....	22

2.11.5	Corrección en función de la presión de inflado.....	22
2.11.6	Comprobación final.....	23
2.12	Algunas prácticas que se han realizado en campo para eliminar la compactación del suelo agrícola.....	24
2.13	Técnicas de evaluación de compactación de suelos en laboratorio.....	25
2.13.1	Límite de plasticidad.....	25
2.13.2	Límite inferior de plasticidad.....	25
2.13.3	Límite superior de plasticidad.....	26
2.13.4	Densidad aparente.....	26
III	MATERIALES Y METODOS.....	27
3.1	Etapa 1. Identificación de sitios bajo actividad agrícola de suelos representativos de las áreas de riego del Estado de Coahuila.....	28
3.2	Etapa 2. Selección de sitios para la toma de muestras de suelo similares en Textura a las identificadas en las áreas de riego.....	28
3.3	Etapa 3. Cálculo del límite inferior de plasticidad y establecimiento del rango de humedades para la prueba en laboratorio.....	29
3.3.1	Calculo del límite inferior de plasticidad.....	29
3.3.2	Cálculo de gramos de agua (método gravimetrico)....	29
3.4	Etapa 4. Procedimiento para la aplicación de cargas en distintas humedades del suelo.....	31
3.4.1	Calibración del equipo.....	31
3.4.2	Preparación de las muestras de suelo y el proceso de compactación en laboratorio.....	32
3.5	Etapa 5. Calculo de resultados de las pruebas en laboratorio...	32
3.5.1	Densidad aparente.....	33
3.5.2	Porosidad del suelo.....	33
IV.-	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	
4.1.	Identificación de los principales tipos de suelos en las regiones donde se practica la agricultura bajo riego en el Estado de Coahuila.	34
4.2.	Selección de sitios para la toma de muestras de suelo similares en Textura a las identificadas en las áreas de riego.....	35

4.3. Determinación del límite Inferior de plasticidad (LIP) y establecimiento del rango de humedades para la prueba en laboratorio.....	36
4.4. Selección para la aplicación de cargas en distintas humedades de muestras de suelo.....	36
4.5 Resultados obtenidos en laboratorio.....	39
V.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	44
I.- LITERATURA CITADA.....	46
VII.-ANEXOS.....	50
1. Análisis de datos de la prueba de suelo "Estación San Juan" ..	51
2. Análisis de datos de la prueba de suelo "Centro del Bajío"	56
3. Análisis de datos de la prueba de suelo " El Rastro".....	61

INDICE DE CUADROS

Pagina

Cuadro 2.1. Clasificación de las partículas inorgánicas por tamaño.....	7
Cuadro 2.2. Espacio poroso del suelo y algunas funciones.....	9
Cuadro 2.3. Valores críticos de densidad aparente.....	15
Cuadro 2.4. Masa total necesaria en el tractor (Kg) en función de la potencia del motor.....	19
Cuadro 2.5. Masa en cada eje, en porcentaje sobre la masa de referencia del tractor (sin aperos).....	21
Cuadro 2.6. De Ajuste inicial para peso del tractor.....	21
Cuadro 2.7. Corrección en función de la presión de inflado.....	22
Cuadro 2.8. Variación de la carga admitida en función de la presión de inflado.....	23
Cuadro 2.9. Valores para evaluar el índice de plasticidad.....	26
Cuadro 2.10. Valores para evaluar la densidad aparente.....	26
Cuadro 4.1. Textura de los suelos de las áreas agrícolas de riego en el Estado de Coahuila.....	34
Cuadro 4.2. Texturas de los suelos de las áreas agrícolas representativas en la "UAAAN" Valdés, (1985).....	35
Cuadro 4.3. Valores de (LIP) y Rango de Humedad para cada sitio en estudio.....	36
Cuadro 4.4. Presión obtenida en base al peso y área de contacto de los neumáticos del tractor en forma estática.....	37
Cuadro 4.5. Valores de la fuerza aplicada a cada una de las muestras de suelo.....	37

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pagina
Figura 2.1 Desarrollo de un cultivo en un suelo.....	14
Figura 2.2 Neumáticos agrícolas.....	20
Figura 3.1 Toma de muestras de suelo en campo.....	28
Figura 3.2 Secado de las muestras de suelo en temperatura ambiente...28	28
Figura 3.3 Diagrama del simulador de compactación neumático alimentado por un compresor.....	31
Figura4.1. Simulador de compactación neumático alimentado por un compresor.....	38
Figura 4.2 Relación entre humedad, presión y porosidad del suelo en el sitio (estación San Juan) con textura Migaron Arenoso.....	39
Figura 4.3 Relación entre humedad, presión y porosidad del suelo en el sitio (Centro del Bajío) con textura Migaron Arcilloso.....	41
Figura 4.4 Relación entre humedad, presión y porosidad del suelo en el sitio (el Rastro) con textura Migaron.....	42

RESUMEN

En el estado de Coahuila la agricultura más productiva se realiza en los municipios de las regiones sureste y la Laguna en áreas de riego (cultivos anuales y forrajes). En estos sistemas de producción las labores están altamente mecanizadas, en esta circunstancia el riesgo de problema de compactación de suelos debido al uso intensivo de maquinaria es alto si no se cuenta con información de un manejo adecuado del tráfico de la maquinaria agrícola.

El presente trabajo se realizó para obtener información acerca de los contenidos de humedad óptimos a los que se deberán trabajar los suelos de forma mecánica y con características similares a los de esas regiones ya mecanizadas para evitar la compactación.

El desarrollo de este trabajo, se realizó en cinco etapas; el se inicio con la identificación de los principales tipos de suelo en las regiones donde se practica la agricultura de riego, luego se seleccionaron los sitios para la toma de muestras de suelo similares en textura a las identificadas en las áreas de riego, posteriormente se determino el limite inferior de plasticidad (LIP) para cada sito en estudio, posteriormente se procedió a calibrar el equipo compactador para aplicar distintas cargas en diferentes humedades del suelo y por último el cálculo de resultados obtenidos de las pruebas en laboratorio.

De los resultados que se obtuvieron podemos mencionar que para realizar las labores con maquinaria en un suelo de textura migajón arenoso se puede trabajar con un límite máximo de un 25.5 % de humedad en el suelo en (análisis gravimétrico), para un suelo con textura migajón arcillosa es de 29% de humedad (análisis gravimétrico) y para un suelo con textura migajón es de 54% de humedad (análisis gravimétrico).

Por lo anterior es posible contribuir a la solución del problema de compactación del suelo por el paso de maquinaria, conociendo los límites óptimos de humedad a la que se puede trabajar cada tipo de suelo sin sufrir compactación.

I. INTRODUCCION

Uno de los problemas mas serios en la agricultura moderna es la pérdida de espacio poroso de los suelos, este fenómeno es denominado compactación y está íntimamente relacionado con el manejo del suelo, especialmente con el uso inadecuado de maquinaria agrícola. Se dice que un suelo tiene problemas de compactación cuando su densidad aparente es superior a 1.3g/cm^3 , en este estado las raíces de las plantas tienen dificultad para penetrar la matriz del suelo y en algunos casos se desarrollan horizontalmente, reduciéndose el aprovechamiento de los nutrientes, el agua y el anclaje de las plantas (Materechera *et al.*, 1993). La habilidad del suelo que tiene para soportar la vegetación, depende principalmente de su adecuación como medio para el crecimiento de raíces (Kramer, 1983). Por su parte, la habilidad de la raíz para encontrar espacio en el cual crecer o forzar su camino en el suelo, es a veces el factor limitante más importante para el crecimiento de la planta (Russell, 1973). Estas limitantes debido a condiciones de compactación a profundidades del suelo sobre el piso de arado. La tendencia hacia el uso de maquinaria pesada, equipos de labranza y el tráfico vehicular sobre tierras agrícolas ha incrementado no solo la severidad, sino además la profundidad a la cual ocurre la compactación del suelo (Hakansson, 1982 citado por Materechera *et al.*, 1992). El excesivo laboreo incrementa la compactación. Esto es particularmente cierto por los frecuentes pases de rastra cuando las condiciones de humedad del suelo no son las ideales. El continuo laboreo con implementos que se utilizan siempre a las mismas profundidades, de trabajo de arado y/o rastra, acaban formando con el tiempo los pisos de arado o de rastra, que son barreras ocultas que ocasionan restricciones para el desarrollo normal de las plantas.

1.1 El Problema de la Compactación.

1.1.1 El problema de la compactación en general.

Desde un punto de vista agrícola, el incremento de los pesos en la maquinaria agrícola causa una transmisión del estrés en profundidad, incluso con las mismas presiones o debido a un contacto menor. Así, los estrés mayores no sólo inducen a una compactación intensa del suelo en la capa superficial del mismo, sino también en el subsuelo. Estos problemas son especialmente severos en los suelos de textura pesada y drenados pobremente. La respuesta de las cosechas a la compactación del suelo es bien conocida, y como consecuencia de esta deformación del suelo la productividad desciende mientras que la erodibilidad se incrementa notablemente (Canillas and Salokhe, 2002).

La compactación afecta sobre todo a suelos de elevada productividad y suelos agrícolas muy mecanizados o a prados húmedos con una gran densidad de ganado.

De acuerdo con el mapa mundial de degradación de suelos inducida por la actividad humana (Oldeman, 1991), se considera que unos 33 millones de hectáreas, lo cual representa un 4 % de la superficie europea, presenta riesgo de sufrir compactación.

1.1.2.- El problema de la compactación en México.

Los mayores problemas físicos de los suelos en el país están relacionados al encostramiento en las áreas de riego; en el Norte del país esta afectado por encostramiento relacionado con salinidad, compactación de suelos que se deriva de un uso intenso de maquinaria agrícola así como labores profundas que alteran la red de los horizontes del suelo y provocan una compactación considerable.

Debido a ello se forma lo que llamamos piso de arado, que es una capa compactada que no permite penetración de las raíces a las zonas de humedad y nutrientes disponibles; otro factor es por el ganado, el sobre pastoreo es uno de los procesos de degradación físicos grave (Sánchez, 2003).

1.1.3. El riesgo de la compactación en las zonas agrícolas del estado de Coahuila.

En el estado de Coahuila ubicado al Norte de México, la agricultura más productiva se realiza en los municipios de la región Sureste y Laguna en áreas de riego (cultivos anuales y forrajes, INEGI 2002), en el cual sus labores están altamente mecanizadas, en esta circunstancia el riesgo de problema de compactación es alto si no se cuenta con información de un manejo adecuado del tráfico de la maquinaria. En estas áreas se cultivan 7,475 hectáreas en donde potencialmente existe el riesgo de compactación y por lo tanto hay una disminución drástica de su productividad total. Es necesario entonces generar información que pueda ser aplicada por el productor para un manejo adecuado de los sistemas de mecanización.

1.2 Objetivos.

Objetivos generales:

- Determinar la carga y el contenido de humedad a la que puede ser sometidos los suelos representativos de las áreas agrícolas antes de sufrir compactación.

Objetivos específicos:

- Establecer los límites de humedad a la que se deben realizar las labores con maquinaria en algunos suelos bajo producción agrícola en Coahuila.

1.3 Hipótesis.

- Es posible contribuir a la solución del problema de compactación del suelo por el paso de maquinaria, estableciendo los límites a la que puede ser trabajada cada tipo de suelo sin sufrir compactación. Estos límites pueden establecerse por medio de pruebas sencillas de laboratorio.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1.- Que es la compactación y que problemas ocasiona.

El suelo esta compuesto por tres fases las cuales son la fase sólida que esta compuesta de las diferentes partículas de suelo, la fase liquida que básicamente esta compuesta del agua y la gaseosa compuesta de aire. La compactación es el aumento de la fase sólida en comparación de la fase liquida y gaseosa, produciendo un adhesionamiento (endurecimiento) del suelo, impidiendo el normal desarrollo de las raíces y por consiguiente un mal desarrollo del cultivo que al final conlleva a una baja producción.

2.2. Mecánica de suelos.

En la agronomía, el suelo es la capa superficial de la corteza terrestre que contiene minerales, materia orgánica, aire, agua y los nutrientes necesarios para dar sostén y desarrollo a las plantas superiores.

2.2.1 Propiedades mecánicas de los suelos agrícolas.

Ortiz (1989), los suelos agrícolas no solo constituye el soporte y la fuerza de alimentación de las plantas de cultivo, sino además son objeto de una serie de acciones por parte de los vehículos y maquinas agrícolas.

La mala utilización del terreno de labor así como de los equipos mecánicos tiene una incidencia negativa en el crecimiento y desarrollo del cultivo, consumo de energía, facilidad de erosión y otros factores como:

- Compactación
- Resistencia a la penetración

Compactación.

Por compactación entendemos el proceso por el cual se genera una variación de volumen de suelo bajo acción de fuerzas de compresión que pueden ser de origen mecánico (paso de tractores), o naturales (humectación, desecación, impacto de las gotas de lluvia, etc.).

La cuantificación del estado de compactación se realiza en base a los valores que toman una serie de propiedades del suelo, tales como:

- Porosidad y
- densidad aparente.

Resistencia a la penetración.

La resistencia de un suelo a la penetración de una determinada herramienta de sondeo, constituye una variable que aglutina otras propiedades del suelo tales como compactación, cohesión y razonamiento interno. Nos da una idea de la dureza de este suelo para las condiciones específicas que se encuentran en un determinado momento.

2.2.2 Propiedades físicas del suelo.

Estas propiedades corresponden a la textura, estructura, consistencia, densidad y porosidad.

a) Textura.

Se denomina textura la proporción relativa en que se encuentran las partículas inorgánicas de diferentes tamaños, menores de 2 mm, en la matriz del suelo.

Las partículas inorgánicas se clasifican en tres grandes grupos, de acuerdo con su tamaño, a saber:

- las arenas, que son las de mayor tamaño
- los limos, de un tamaño intermedio y
- las arcillas, las más pequeñas.

En esta clasificación sólo se tiene en cuenta el tamaño, no los minerales que las componen

Existen dos clasificaciones de estas partículas inorgánicas, la primera debida al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) y la segunda debida a la sociedad de ciencia del suelo (ISSS), en el cuadro 2.1 se presentan ambas clasificaciones.

Cuadro 2.1. Clasificación de las partículas inorgánicas por tamaño

NOMBRE DE LA PARTÍCULA	TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS (mm)	
	SISTEMAS	
	U.S.D.A.	I.S.S.S.
Arena muy gruesa	1.0 – 2.0	
Arena gruesa	0.5 – 1.0	0.2 – 2.0
Arena media	0.25 – 0.5	
Arena fina	0.10 – 0.25	0.02 – 0.2
Arena muy fina	0.05 – 0.10	
Limo	0.002 – 0.05	0.002 – 0.02
Arcilla	< 0.002	< 0.002

Fuente: según (USDA, ISSS).

La determinación del porcentaje de partículas inorgánicas de cada uno de los tamaños en una muestra de suelo se realiza en el laboratorio, mediante un procedimiento que aplica la Ley de Stokes.

b) Estructura.

La estructura puede definirse como el tamaño y la forma geométrica de los agregados del suelo.

La estructura, según Montenegro (1990), tiene influencia en la mayoría de los factores de crecimiento de las plantas, siendo así considerada como la propiedad física clave para el desarrollo de las plantas en determinados casos y además de ser un factor limitante de la producción.

c) Consistencia.

Puede definirse como la resistencia que opone una masa de suelo en su estado natural a las fuerzas externas tendientes a su deformación y ruptura.

Según los estudios de Atterberg en la mayor parte de los suelos se distinguen varios estados de consistencia:

- **Estado coherente.**

Se presenta cuando el suelo está seco, manifestándose por una extrema dureza de los terrones del suelo.

- **Estado frágil.**

El suelo es blando, se distingue fácilmente sin pulverizarse y en él se presenta el rango de humedad óptimo para el laboreo. Ya que se produce la menor alteración de la estructura. En los suelos agrícolas, dentro del estado de friabilidad, se presentan dos índices de consistencia importantes para su manejo.

Límite de soltura (LS): llamado también límite de glutinosidad, límite de pegajosidad o punto de detersión (Baver et. Al., 1963).

Límite inferior de plasticidad (LIP): es el contenido de humedad en el cual, las fuerzas de cohesión y adhesión se igualan. Normalmente el valor de este límite es ligeramente mayor que el valor del límite de soltura y es el límite máximo de humedad que debe tener el suelo para ser sometido a la labor con bajo riesgo de deterioro físico.

- **Estado plástico.**

Es el rango de humedad del suelo en el cual se deja moldear y conservar las deformaciones que le ocasionan fuerzas externas. En el cual se presenta la mayor fuerza de adhesión.

Límite líquido: se define como el contenido mínimo de humedad en el suelo, en el cual este empieza a comportarse como un fluido, es decir, a deformarse bajo su propio peso; a medida que aumente la humedad, será mayor el riesgo de compactación.

d) Porosidad.

En la matriz del suelo, el espacio poroso es aquella parte del volumen que no está ocupada por partículas sólidas, pero si por aire y agua, está intimamente relacionada con la estructura y el contenido de materia orgánica. La porosidad es una característica física importante que se relaciona directamente con propiedades como retención y movimiento del agua, la aireación, la transferencia de oxígeno en el medio radical y la facilidad con que las raíces pueden penetrar en el suelo y absorber los nutrientes. Se calcula con la siguiente fórmula:

$$P = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) \times 100$$

Donde: P = Porosidad expresada en %

D_a = Densidad aparente en g / cm³ ó Kg / m³

D_r = Densidad real en g / cm³ ó Kg / m³

En el siguiente cuadro se observa una clasificación de los poros del suelo y algunas de las funciones que cumplen.

Cuadro 2.2. Espacio poroso del suelo y algunas funciones

CLASIFICACIÓN DEL PORO	DIÁMETRO DEL PORO MICRAS (μ)	TENSIÓN DE HUMEDAD EN ATMOSFERAS	FUNCIÓN DEL PORO CON RELACIÓN AL AGUA
Grande	60 o más	0.05 o menos	Poros de drenaje y aireación
Medianos	10 – 60	0.005 – 1/3	Poros de ascenso capilar
Pequeños	0.2 – 10	1/3 – 15	>Poros para almacenamiento de agua aprovechable
Superficies higroscópicas	0.2 o menos	15 o más	Almacenamiento de agua higroscópica

Tomado de: Modulo de suelos, Muñoz Rodrigo, 1988

e) **Densidad Aparente.**

Es la cantidad de masa de suelo seco sin alterar por unidad de volumen, se calcula con la siguiente fórmula:

$$D_a = \frac{M_{ss}}{V_{sa}}$$

Donde: D_a = Densidad aparente en g / cm³ ó Kg / m³

M_{ss} = Masa de suelo seco en g ó Kg

V_{sa} = Volumen de suelo seco sin alterar en cm³ o m³

Regularmente la densidad aparente de los suelos presenta una variación entre 1.0 – 1.9 g / cm³, pero los suelos derivados de cenizas volcánicas, con un elevado contenido de minerales amorfos (alófana) y de materia orgánica, la densidad aparente puede ser excepcionalmente baja, entre 0.3 – 1.0 g / cm³. La densidad aparente es una característica que sirve para calcular la porosidad total, la lámina de riego, el peso de la capa arable de una hectárea de terreno e indica el grado de compactación del suelo.

En Venezuela, la investigación en el campo de la Ciencia del Suelo concluye que existen graves problemas de compactación, los cuales son la causa del rápido descenso de la productividad de los suelos agrícolas que utilizan sistemas de labranza intensiva, pero existen pocos trabajos que evalúan su incidencia sobre los cultivos desarrollados en nuestras tierras arables de condiciones tropicales, además de plantear alternativas para prevenir y corregir estos problemas (Florentino, 1989).

La compactación de suelo por debajo de la profundidad normal de labranza es de una creciente importancia, debido a sus efectos detrimentales consecuentes y persistentes (Blake *et al.*, 1976) sobre el rendimiento de los cultivos (Gaultney *et al.*, 1982).

La labranza mecanizada pueden causar un severo impedimento mecánico al crecimiento de la raíz en suelos tropicales altamente meteorizados, y el sistema de no - labranza por sí solo, no puede ser usado

satisfactoriamente en suelos compactados (Lal, 1986 citado por Benites y Ofori, 1993).

La arquitectura de la raíz es clave en la repartición de los recursos del suelo para las plantas y en la disminución de la competencia interespecífica (Milchunas *et al.*, 1992). Los patrones radicales difieren en su regularidad por dos tipos de razones: uno inherente al patrón, cuando las raíces laterales se derivan del eje principal y son originalmente más cercanas a él; el otro por ser un patrón impuesto, debido a las características del suelo, que estimulan o restringen el desarrollo radical localmente. El análisis del patrón que refleja la ramificación inherente, puede ser comparado con aquellos observados en suelos reales. Las diferencias en los patrones, pueden entonces ser atribuidos a las características del suelo (Van Noordwijk *et al.*, 1993).

2.2 Origen de la compactación.

La compactación del suelo corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas que actúan sobre él.

Las fuerzas que originan la compactación básicamente podemos clasificarla en dos grupos:

- a) Internas
- b) Externas

Las fuerzas internas se producen principalmente por los efectos de humectación, desecación que se traduce respectivamente en un aumento de volumen de suelo debido a la hinchazón de las arcillas y a una posterior retracción.

Las fuerzas externas en la actividad agrícola, tienen su origen principalmente en:

- Implementos de labranza del suelo.
- Cargas producidas por los neumáticos de tractores e implementos de arrastre y
- Pisoteo de animales.

En condiciones naturales (sin intervención antrópica) se pueden encontrar en el suelo, horizontes con diferentes grados de compactación, lo que se explica por las condiciones que dominaron durante la formación y la evolución del suelo. Sin embargo, es bajo condiciones de intensivo uso agrícola que este fenómeno se acelera y llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas cultivadas.

2.4 Causa que se relacionan con la compactación de los suelos agrícolas.

Esencialmente se producen por el efecto repetitivo, mismo que se acumula por el uso de la maquinaria agrícola pesada, así como por el pastoreo excesivo en condiciones de humedad elevada del suelo.

Existen tres tipos de compactación:

- 1) La producida a poca profundidad
- 2) A mayor profundidad, y
- 3) A nivel del subsuelo.

2.4.1 Maquinaria.

La primera tiene lugar preferentemente en las fases preparatorias de la tierra para la siembra, con la utilización de fertilizantes y pesticidas.

- ❖ Peso de la maquinaria
- ❖ Distribución del peso de la maquinaria
- ❖ Ancho de los neumáticos
- ❖ Presión de inflado de los neumáticos
- ❖ Patinaje de las ruedas
- ❖ Velocidad de trabajo
- ❖ Número de pasadas de la maquinaria
- ❖ Profundidad de trabajo del implemento de laboreo de suelo

2.4.2 Implementos.

La segunda es la generada por los implementos agrícolas, que son los causantes del pie de arado.

- ❖ Por compresión de los elementos de corte
- ❖ Por compresión de los elementos de volteo
- ❖ Por compresión mediante dispositivos desterronadores

2.4.3 Suelo.

La tercera es la compactación a nivel del subsuelo causada por la maquinaria pesada utilizada durante la cosecha y por la diseminación de restos orgánicos de origen animal con tanques de gran capacidad que poseen ejes pesados. La compactación del suelo es potencialmente la mayor amenaza para la productividad agrícola.

- ❖ Características físicas y propiedades mecánicas del suelo
- ❖ Contenido de humedad del suelo

2.5 Efectos de la compactación en los suelos agrícolas.

Según (Botta, g. Dagostino, 2001), la compactación del suelo produce un aumento en densidad aparente, aumenta una resistencia mecánica, destruye y debilita su estructuración. Los efectos que la compactación produce, se traduce en un menor desarrollo del sistema radical de las plantas y, por lo tanto, un menor desarrollo de las plantas en su conjunto, lo que redundará en una menor producción. Dichos efectos son:

a) Aumento de la resistencia mecánica del suelo

El aumento de la resistencia mecánica del suelo va a restringir el crecimiento de las raíces a espacios de menor resistencia, tales como los que se ubican entre las estructuras (terrones), en cavidades formadas por la fauna del suelo (lombrices) y en espacios que se producen por la descomposición de restos orgánicos gruesos (raíces muertas). Esta situación va a producir un patrón de crecimiento característico de raíces aplanadas, ubicadas en fisuras del suelo, con una escasa exploración del volumen total del suelo.

b) Disminución de la macro porosidad del suelo

La disminución de la porosidad del suelo va a producir una baja capacidad de aireación y oxigenación del suelo, lo que va a producir una disminución de la actividad de las raíces y, consecuentemente, un menor crecimiento de éstas, un menor volumen de suelo explorado, una menor absorción de agua y nutrientes. Este efecto se agrava cuando se riega en forma excesiva, llegando a producirse la muerte de las raíces por asfixia.

2.6 Dificultad para la penetración de las raíces.

Tras la nascencia de la planta, es necesario que se produzca un intenso desarrollo de su sistema radicular para que pueda iniciar la absorción de agua y nutrientes. En ocasiones se produce la muerte de una plantación o un lento desarrollo de la misma sin causa explicable aparente, la razón suele ser, en la mayoría de los casos, una grave dificultad en el desarrollo radicular.

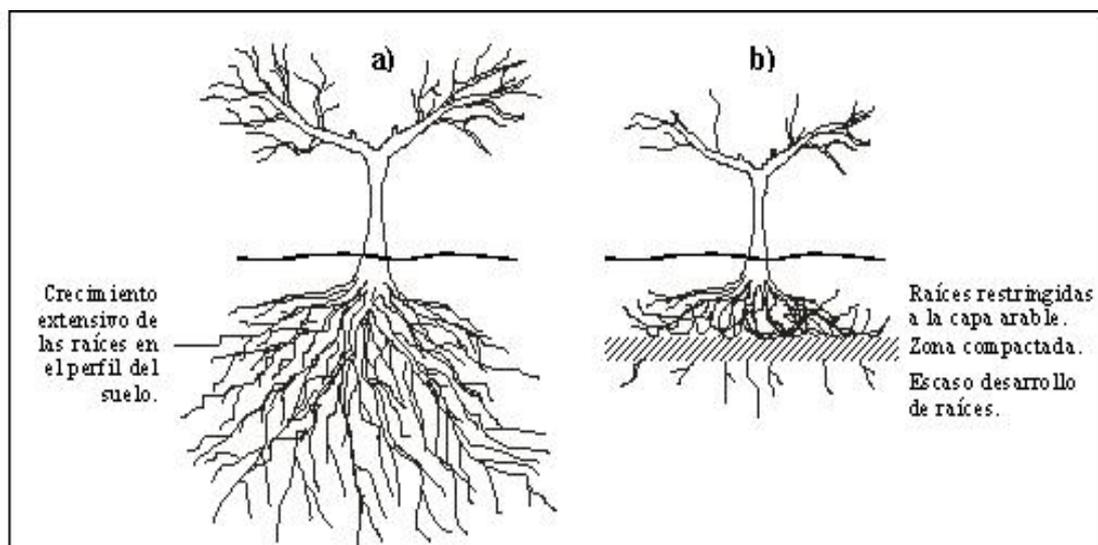


Figura 2.1 Desarrollo de un cultivo en un suelo sin restricciones físicas de suelos (a) y el mismo cultivo desarrollándose en un suelo que tiene una estrata de suelos compactada (b). (Infoagro, 2002).

En otras ocasiones, las causas del deficiente desarrollo radicular están inducidas por un manejo inadecuado del suelo, como es la formación de "suelas de labor" u otras formas de compactación del mismo. La raíz en su crecimiento debe realizar un trabajo contra la presión ejercida por el suelo y proporcional al volumen de suelo que debe desplazar en su crecimiento.

En un suelo bien estructurado, en el que existan poros de tamaño suficiente para alojar a la raíz, el segundo componente carece de importancia, por lo que el crecimiento estará en función de la presión ejercida por el suelo, que en el caso citado será muy baja.

A medida que se incrementa la compactación del suelo y decrece el espacio poroso, el trabajo de la raíz ha de ser mayor para lo cual necesita un elevado suministro de energía, que se traduce en mayores necesidades de agua y de nutrientes; los cuales le son más difíciles de obtener al disminuir la superficie absorbente. En el mejor de los casos, todo ello lleva consigo una menor formación de materia seca, con disminución del crecimiento y del rendimiento de la producción con un mismo consumo de agua y nutrientes. La compactación se caracteriza por un aumento de la densidad aparente, un empaquetamiento muy denso de las partículas del suelo y una disminución de la porosidad y especialmente de la de mayor tamaño.

Cuadro 2.3. Valores críticos de densidad aparente.

Textura	Densidad
Franco-arcillosa	1.55
Franco-limosa	1.65
Franco-arenosa fina	1.8
Arenosa-franca fina	1.85

Fuente: (Infoagro, 2002).

2.7 Impacto de la compactación.

La compactación modifica la actividad bioquímica y microbiológica del suelo. El mayor impacto físico que se produce, es la reducción de la porosidad, lo que implica una menor disponibilidad tanto de aire como de agua para las raíces de las plantas. Al mismo tiempo, las raíces tienen más dificultad en penetrar en el suelo y un acceso reducido a los nutrientes. La actividad biológica de esta forma queda sustancialmente disminuida. Otro efecto de la compactación es el aumento de la escorrentía, disminuye la capacidad de filtración del agua de lluvia. Esto incrementa el riesgo de erosión producido por el agua y la pérdida de las capas superficiales de suelo y la consiguiente pérdida de nutrientes.

Existen cálculos estimativos sobre la pérdida de productividad de las cosechas debido a este fenómeno que en el caso de la compactación de la superficie de suelo alcanza valores de hasta el 13 % mientras que la compactación del subsuelo puede ocasionar pérdidas de entre un 5-35 %.

2.8 Magnitud de la compactación.

Afecta sobre todo a suelos de elevada productividad y suelos agrícolas muy mecanizados, así como a prados húmedos con una gran densidad de ganado. De acuerdo con el Mapa Mundial de degradación de suelos inducida por la actividad humana (Oldeman et al. 1991), se considera que unos 33 millones de hectáreas, lo cual representa un 4% de la superficie europea, presenta riesgo de sufrir compactación.

En la Comunidad Autónoma del País Vasco, la compactación producida en los suelos agrícolas cobra especial importancia en la zona de Araba donde la agricultura es más intensiva. La creciente utilización de maquinaria cada vez más pesada hace que este problema tienda a agravarse en el futuro. A nivel de toda la Comunidad Autónoma existe un problema importante adicional, la compactación del suelo producido por el sellado de la superficie para usos residenciales e industriales. La elevada densidad geográfica de ciertas zonas implica grandes porcentajes de tierra sellada en los que se han deteriorado totalmente las condiciones naturales del suelo. Respecto a la compactación del subsuelo, debido a que no es fácil de detectar sin aparatos de medida específicos, el área afectada por este tipo de degradación tiende a ser infravalorada.

2.9 Medidas correctivas.

La compactación de la superficie del suelo es fácilmente eliminada roturando el suelo de forma adecuada y, eventualmente puede desaparecer después de un par de años si se deja que los procesos biológicos sigan su curso. La compactación del subsuelo, sin embargo, es más persistente y no puede ser eliminada fácilmente ya que las técnicas actuales no aportan soluciones a largo plazo.

La mejor medida a aplicar es la prevención. En los suelos agrícolas, como la compactación es causada sobre todo por la maquinaria pesada, se puede prevenir incrementando el número de ejes y ruedas de la maquinaria agrícola, aumentando la anchura de los neumáticos y reduciendo su presión (Hakanson, 1994). El uso de vehículos más pequeños y ligeros no es precisamente beneficioso ya que requiere pasadas más frecuentes, que pueden dar un efecto contrario al deseado. Otra medida preventiva a aplicar es la referente a la planificación de las labores agrarias, por ejemplo evitar el uso de maquinaria pesada en condiciones de humedad.

2.10 Costo de la compactación.

Es difícil calcular el coste total debido a la compactación. El problema principal para el agricultor es su productividad, lo cual le puede inducir a error: “si no hay disminución de producción, no hay problema”. Pero la realidad es distinta. Por ejemplo, en el trigo en años muy húmedos puede ocurrir que si hay lluvias muy frecuentes, el cultivo “sobrevive” en los primeros 15-20 cm del suelo sin que haya una disminución en la cosecha. Pero en años más secos, que en nuestras condiciones es lo usual, podemos tener pérdidas considerables. En el caso de algodón se han detectado pérdidas del 20-50 % debido a la compactación del suelo (Mc Garry, 2001) y en cereales de grano, hasta un 50 %.

Por otra parte, hay un evidente incremento de costos, y el agricultor no conservacionista es el que los paga todos; en primer lugar, el costo de la labranza intensiva, primer causante de la degradación del suelo; en segundo lugar, las pérdidas de producción; y por último, las labores de corrección para romper la capa compactada, que a su vez aumenta de nuevo el riesgo de una nueva compactación. Es una espiral hacia el problema de raíz, más que una solución. En EE.UU., solo por disminución de producción se cifraron las pérdidas causadas por la compactación de los suelos en 1994 en más de 1000 millones de euros.

Es necesario pensar no solo en el corto plazo, para además de solventar el problema de la compactación, mejorar la estructura del suelo para futuras generaciones.

2.11 Factores a considerar por la compactación con maquinaria.

2.11.1 Lo que debe pesar un tractor.

Es frecuente que las personas verifiquen su peso en función de su talla. Algo parecido habría que hacer en los tractores, tomando como referencias la potencia disponible, o el porcentaje de la misma que se va a utilizar en una determinada labor, pero también se necesita considerar la velocidad a la que se avanza, ya que la potencia de tracción depende del producto del esfuerzo que se realiza por la velocidad de avance: para poder tirar de una apero se necesita cierto peso en el tractor, para avanzar deprisa se necesita potencia disponible.

Como una primera aproximación, habrá que elegir los neumáticos para las condiciones de trabajo de la labor mas pesada; en principio el trabajo del suelo con arado o apero equivalente. Suponiendo que se utilizará el 75% de la potencia disponible en el motor (potencia “homologada” o valor equivalente), el peso necesario en el tractor (peso en vacío mas lastre en forma de masas metálicas y agua en las ruedas.

En el cuadro 2.4 aparece calculado el peso del tractor (con lastre) necesario en función de la potencia del motor y la velocidad de trabajo. Notas:

- La masa puede ser del propio tractor o inducida por los aperos utilizados, pero en ambos casos sirve de referencia para el dimensionamiento de los neumáticos.
- Las velocidades utilizadas son teóricas, y no tienen en cuenta el resbalamiento.
- Se considera que la potencia utilizada en tracción es el 75% de la potencia máxima disponible en el motor.

En ella se puede observar que un tractor de 80 CV (doble tracción) deberá de pesar 5400 kg (incluido el lastre) para poder trabajar con el 75% de la potencia disponible a 4.5 km/h este peso debe de aumentarse para conseguir lo mismo en simple tracción u reducirse si se trabaja a 6.5 km/h.

Cuadro 2.4. Masa total necesaria en el tractor (kg) en función de la potencia del motor, para diferentes velocidades de trabajo sobre rastrojo (adherencia=0.6).

Velocidad	4.5 km/h		6.5 km/h	
Coef_tr	2 RM	2+2 RM	2 RM	2+2RM
Potencia (CV)	0.85	1	0.85	0.85
50	3971	3375	2749	2337
60	4765	4050	3299	2804
70	5559	4725	3848	3271
80	6353	5400	4398	3738
90	7147	6075	4948	4206
100	7941	6750	5498	4673
110		7425	6048	5140
120		8100	6597	5608
130		8775	7147	6075
140		9450	7697	6542
150		10125		7010
160		10800		7471

Chef. tr; Coeficiente de tracción, 2 RM; Tracción sencilla, 2+2 RM; Doble tracción.

2.11.2 Neumáticos agrícolas.

Los neumáticos que se montan en los vehículos agrícolas deben satisfacer los siguientes requisitos básicos:

1. Soportar y transmitir al terreno el peso del vehículo, y amortiguar las transmisiones que se producen durante la marcha.
2. Asegurar en los ejes trasero y delantero un suficiente despeje con el terreno.
3. Transmitir al terreno las fuerzas de tracción, dirección y frenado.
4. Proporcionar una larga utilización con un bajo mantenimiento y ser resistente a la acción del medio ambiente.

El peso que es capaz de soportar un neumático depende del volumen de aire que puede encerrar y de la presión máxima de inflado. El valor de esta presión viene determinada por el número de lonas (ply-rating) de la cubierta; cuanto mayor es este número mayor es la presión de inflado y mayor es el peso que puede soportar.

Un neumático está constituido por una carcasa o estructura de hilos engomados que soporta la carga que gravita sobre el mismo, además asegura su resistencia y flexibilidad. En los neumáticos convencionales, o diagonales Fig.2.2, los hilos de la carcasa se colocan en capas superpuestas, llamadas lonas (ply-rating), que forman ángulos de 40° - 45° , mientras que en los radiales las capas de hilos forman un ángulo de 90° con la dirección de avance. Al objeto de dotar al neumático radial de estabilidad direccional, las capas de hilos se unen entre sí, todo a lo largo de su periferia, con otras capas de hilos engomados que reciben el nombre de lonas de cima.

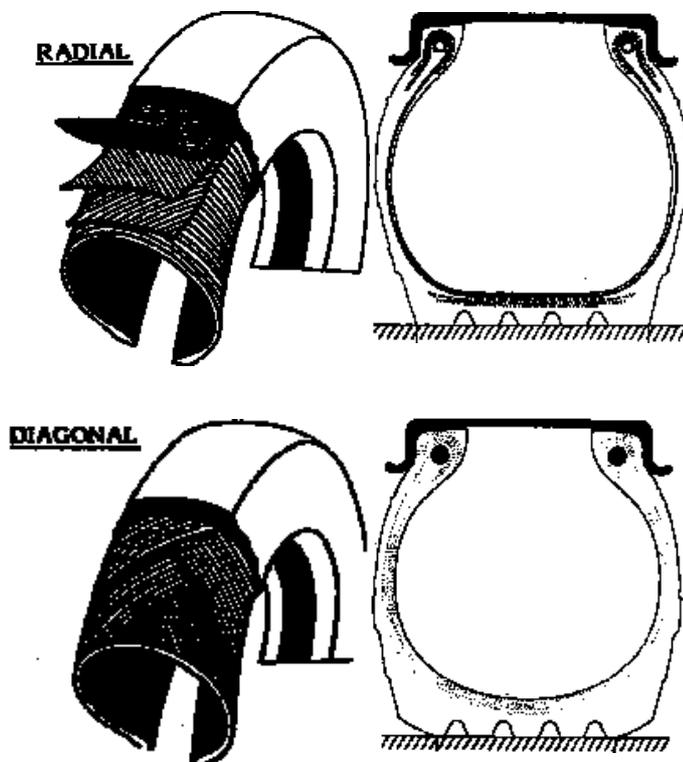


Figura 2.2. Neumáticos agrícolas.

2.11.3 Carga sobre los neumáticos.

El peso del tractor, como consecuencia del esfuerzo que realiza, se incrementa (transferencia de carga inducida por los aperos), a la vez que se reparte entre los ejes delantero y trasero de forma diferente a como se encuentra con el tractor parado.

Cuadro 2.5. Masa en cada eje, en porcentaje sobre la masa de referencia del tractor (sin aperos).

Tipo	Delantera	Trasera
Simple Tracción	30%	100%
Doble Tracción (ruedas desiguales)	50%	80%
Doble Tracción (ruedas iguales)	70%	60%

El peso sobre el eje delantero deberá ser aproximadamente una tercera parte del peso en el eje trasero cuando se usen implementos de remolque.

Cuadro 2.6. De Ajuste inicial para peso del tractor

Tipo de implemento	% de peso en Neumáticos Traseros	% de peso en Neumáticos Delanteros
De remolque	75	25
Semi - integral	70	30
Integral	65	35

2.11.4 Mercado del neumático y capacidad de carga.

Para relacionar el número de capacidad de carga (157 en el ejemplo) con la carga máxima de trabajo admitida se utiliza una tabla que aparece en todos los catálogos de neumáticos (Tabla 3); así: 157 de índice de carga indica el neumático puede trabajar con 4157 kg, incluso a 40 km/h (A8 de índice de velocidad). Un neumático del tipo A8 trabajando a 30 km/h aumenta su capacidad de carga en aproximadamente un 7%.

Cuadro 2.7. Capacidad de carga de un neumático.

INDICE	CARGA								
	kg								
100	800	116	1250	132	2000	148	3150	164	5000
101	825	117	1285	133	2060	148	3250	165	5150
102	850	118	1320	134	2120	150	3350	166	5300
103	875	119	1360	135	2180	151	3450	167	5450
104	900	120	1400	136	2240	152	3550	168	5600
105	925	121	1450	137	2300	153	3650	169	5800
106	850	122	1500	138	2360	154	3750	170	6000
107	975	123	1550	139	2430	155	3875	171	6150
108	1000	124	1600	140	2500	156	4000	172	6300
109	1030	125	1650	141	2575	157	4125	173	6500
110	1060	126	1700	142	2650	158	4250	174	6700
111	1090	127	1750	143	2750	159	4375	175	6900
112	1120	128	1800	144	2800	160	4500	176	7100
113	1150	129	1850	145	2900	161	4625	177	7300
114	1180	130	1900	146	3000	162	4750	174	7500
115	1215	131	1950	147	3075	163	4875	179	7750

Índice; indica la capacidad de carga el cual un neumático puede soportar.

Las capacidades de carga de un neumático se reducen a medida que lo hace la presión de inflado como indica, de manera aproximada el cuadro 2.7

2.11.5 CORRECCION EN FUNCION DE LA PRESION DE INFLADO.

Muy importante es ajustar la presión de inflado del neumático a la carga para las condiciones del suelo en el que se trabaja, ya que en caso contrario el apoyo es diferente al considerado en su diseño, con lo que aumenta su desgaste y la compactación del suelo agrícola.

Cuadro 2.8. Variación de la carga admitida en función de la presión de inflado.

Presión de inflado (bar)	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6
Carga por cada 1000kg	577	615	654	692	731	769	808	846	885	923	962	1000

2.11.5.- Comprobación final.

La selección del usuario debe de hacerse en función de la oferta del fabricante, ya que si se utilizan unos neumáticos de mas desarrollo se superan los límites de velocidad fijados en la homologación (40 km/h en España y en la mayoría de los países de la Unión Europea) y aumenta la sobrecarga en las transmisiones, con lo que pueden producirse averías. Los neumáticos con mayor superficie de apoyo (mas anchura de balón) permiten trabajar con menor presión de inflado para una carga similar, provocando menor compactación del suelo.

Recuerde que el ajuste de la presión de inflado para las cargas reales que gravitan sobre las ruedas y su verificación periódica con un manómetro preciso (no dándole golpecitos con el pie) es una garantía para la larga vida de los neumáticos y el mantenimiento de las prestaciones del tractor.

2.12 Algunas prácticas que se han realizado en campo para eliminar la compactación.

Predecir la fuerza del suelo o la vulnerabilidad de los mismos es interesante para prevenir el daño en las propiedades físicas del suelo debidas a la labranza y al tráfico de maquinaria. El riesgo de compactación o vulnerabilidad de los suelos agrícolas, como la resistencia a la compresión, se puede usar para recomendar las técnicas agrícolas adecuadas en cada lugar. Para paliar los problemas causados por la compactación del suelo. En este sentido, se podría aconsejar que la industria de maquinaria agrícola desarrollara máquinas adecuadas a las características geotécnicas de las zonas, y concebidas con la idea de conseguir buenas prácticas agrícolas (Jiménez Salas, 1997).

- ❖ Uso de cubiertas vegetales. El objetivo de esta cubierta vegetal es la de incorporar materia orgánica al suelo a través de la parte aérea y de las raíces de las plantas.
- ❖ Subsolado. La práctica del subsolado consiste en soltar el suelo bajo la profundidad normal de cultivo, usando un arado de uno o más brazos rígidos, con el objetivo de romper capas de suelos compactadas.
- ❖ Uso de acondicionadores físicos. Esta labor consiste en localizar el material (guanos, aserrín, viruta, restos de poda trozados, lodos de aguas servidas, compostas, desechos orgánicos animales y vegetales diferentes, etc.) en hoyos o zanjas, a la profundidad de la estrata de suelos compactada.
- ❖ Camellones. En el caso de plantaciones frutales también es posible agregar suelo de la entre hilera sobre la hilera de plantación, formando un lomo o camellón de suelo suelto donde las raíces encontrarán mejores condiciones para su desarrollo.
- ❖ Incorporación de materia orgánica al suelo. La materia orgánica incorporada al suelo actúa directa e indirectamente favoreciendo la formación y la estabilidad de la estructura del suelo, lo que puede ayudar a prevenir la compactación.

- ❖ Uso de pistas de circulación. Al ubicar pistas exclusivas para el tránsito de la maquinaria se pueda evitar el paso innecesario de maquinaria por la superficie del suelo.
- ❖ Ajustar maquinaria a una misma trocha. Esta medida está orientada a reducir el área que es usada por la maquinaria, manteniendo una sola huella para el paso de las ruedas.

2.13 Técnicas de evaluación de compactación de suelos en laboratorio.

En muchos casos, los suelos presentan tendencia a la compactación o fácilmente se puede conducir a esta condición si se hace un manejo inadecuado de los mismos. Siendo la preparación de los suelos una de las operaciones más costosas y riesgosas en la agricultura, cualquier exceso en ella representará una merma en los beneficios económicos y en una disminución de mediano a largo plazo de las características productivas de los suelos.

En este contexto, el objetivo que se persigue en este trabajo, es el de precisar algunas técnicas para evaluar problemas de compactación que pueden presentarse en suelos que han sido manejados inadecuadamente. Conociendo los parámetros de las propiedades físicas del suelo, a través de las determinaciones respectivas, será posible afinar el manejo del mismo, esencialmente al momento de la preparación antes de la siembra.

Límite de plasticidad.

El índice de plasticidad es el porcentaje de agua gravimétrico en el suelo entre el límite superior e inferior de plasticidad (Montenegro y Malagón, 1990).

Límite inferior de plasticidad .

El límite inferior de plasticidad marca la transición entre la consistencia plástica y la friable y es el contenido máximo de humedad, en el cual el suelo puede manejarse sin deteriorar sus propiedades físicas (Pla, 1976).

Límite superior de plasticidad.

El límite de plasticidad es el contenido de humedad en el cual un suelo comienza a fluir bajo la acción de una fuerza aplicada (Malagon, 1976).

Cuadro 2.9. Valores para evaluar el índice de plasticidad (Pla, 1977).

Índice de plasticidad (%)	Tipo de plasticidad	Observaciones
Mayor de 10	Alta	Suelos muy plásticos y difíciles de cultivar
De 5 a 10	Moderada	Suelos medianamente plásticos. Presentan problemas al usar maquinaria
Menor de 5	Baja	Suelos poco plásticos que pueden cultivarse fácilmente.

Densidad aparente.

La densidad aparente de un suelo es la relación que existe entre la masa o peso seco del suelo y la unidad de volumen aparente del mismo. El volumen aparente incluye a las partículas sólidas y el espacio poroso (Montenegro y Malagón, 1990).

Cuadro 2.10. Valores para evaluar la densidad aparente, citado por Pla (18997)

Textura	Densidad aparente	Valores
Arcillo/franco-arcilloso	> 1.3	Altos
Franco/franco-limoso	> 1.4	Altos
Franco-arenoso	> 1.6	Altos

III. MATERIALES Y METODOS

La implementación de este trabajo, se realizo en cinco etapas: en el cual dentro de cada una de estas etapas se utilizó diferente material y metodología.

3.1. **Primera etapa.** Identificación de los principales tipos de suelos en las regiones donde se practica la agricultura bajo riego en el Estado de Coahuila.

Para comenzar con la investigación del trabajo se utilizaron las cartas de uso potencial y edafológica con escala: 1:50,000 del Estado de Coahuila (INEGI 1982). La carta de uso de suelo se utiliza para localizar los sitios en donde se practica la agricultura de (riego, temporal, nómada y con riego eventual). La carta edafológica nos da la toda la información sobre el análisis de los puntos de verificación (áreas de riego) con los perfiles más detallados como son: Estructura, Textura (% de arena, limo, arcilla), Color, Materia Orgánica, etc.

3.2. **Segunda Etapa.** Selección de sitios para la toma de muestras de suelo similares en Textura a las identificadas en las áreas de riego.

Una vez conocido las características de los suelos a través de la cartografía se seleccionaron sitios dentro del campo experimental Buenavista, donde hubiese suelos similares en características a las identificadas en las áreas de riego para de ahí coleccionar las muestras a procesar en laboratorio.

Una vez localizado los sitios primeramente se tomaron tres muestras en cada uno de los sitios a 20 cm de profundidad, en los mismos sitios se utilizaron tamices del numero 2 y 4 mm para tamizar el suelo y, de las cuales se mezclaron para hacer una sola muestra, habiendo reunido todas las muestras se llevaron al laboratorio de materiales del Depto. de Maquinaria

Agrícola, donde se extendió sobre una mesa las muestras de suelos durante una semana con la finalidad que el suelo se seque en aire lo mas posible.



Figura 3.1. Toma de muestras de suelo en campo.



Figura 3.2 Secado de las muestras de suelo en temperatura ambiente.

3.3. **Tercera Etapa.** Determinación del límite inferior de plasticidad (LIP) y establecimiento del rango de humedades para la prueba en laboratorio.

Una vez secado el suelo se llevo al laboratorio de Física de suelos para determinar el (LIP) tal y como se describe enseguida:

3.3.1. Cálculo del límite inferior de plasticidad.

Tamice de 15-20 g de suelo por 2 mm de abertura. Agregue agua hasta lograr una consistencia plástica, amase y forme cilindros de suelo, de 3 mm de diámetro, aproximadamente. Deslice con la mano sobre un vidrio el cilindro de suelo. Vuelva a repetir el procedimiento hasta una disgregación es decir, que los cilindros empiecen a dividirse en varias partes y determine la humedad del suelo. Este valor representa el límite inferior de plasticidad.

$$LIP = \frac{(PSH - PSS)100}{PSS}$$

Donde:

LIP: Por ciento de humedad en el limite inferior de plasticidad.

PSH: peso del suelo húmedo en (g)

PSS: peso del suelo seco en (g)

Una vez que se encontró el límite inferior de plasticidad (% de humedad), ésto se tomo como referencia y para cada uno de las muestras de suelo se consideraron cinco humedades más por cada tipo de suelo.

3.3.2. Cálculo del rango de humedad a utilizar en las pruebas de compactación.

Para calcular la cantidad de gramos de agua que necesita a cada uno de las muestras de suelo para ubicar las cinco humedades por debajo del LIP, se empleó el método gravimétrico.

Método gravimétrico.

El principio de este método se basa en la determinación de la masa de agua contenida en la masa de sólido de una muestra de suelo. Este método se considera estándar o de referencia pues con el se mide directamente el contenido de humedad del suelo, el cual se calcula por la fórmula:

$$P_w = \left(\frac{M_w}{M_s} \right) \cdot 100$$

De la fórmula anterior se despeja (M_w) y nos queda:

$$M_w = \frac{(P_w) \cdot (M_s)}{100}$$

Donde:

M_w = Masa del agua en (g)

P_w = Porcentaje gravimétrico de agua en las muestras en (%)

M_s = Masa del suelo en (g)

Luego se comenzó a coleccionar dentro de bolsas de plástico muestras de 500 gr de suelo pesándolos en una balanza con una precisión de 0.01 g. Con los valores obtenidos anteriormente en cada uno de las muestras, se utilizó un atomizador para agregarle los mililitros de agua que le correspondía a cada uno de las muestras de suelo hasta llegar a la humedad que debía alcanzar.

Después de haber alcanzado la humedad que necesitaba, cada una de las muestras de suelo, se dejó en reposo durante dos semanas en el laboratorio, con el objetivo de que se homogenizara la humedad en la misma.

3.4. Cuarta Etapa. Procedimiento para la aplicación de cargas en distintas humedades del suelo.

Teniendo todas las muestras de suelo listas (con humedad homogénea) para llevar acabo el procedimiento de compactación y aplicar la presión a la que será sometida cada una de las muestras mediante un simulador de compactación neumático alimentado por un compresor de medio caballo de fuerza (38.02 kgf-m/s), se calibró el equipo compactador.

3.4.1 Calibración del equipo.

Para la calibración del equipo se hizo ajustando 2 reguladores de presión en serie para obtener la presión requerida y poder realizar las pruebas de compactación con las muestras de suelo.

Teniendo ya calibrado el equipo, se regula la presión a la que se va utilizar (200, 400, 600, 800 y 1000 kPa) respectivamente para todas las muestras.

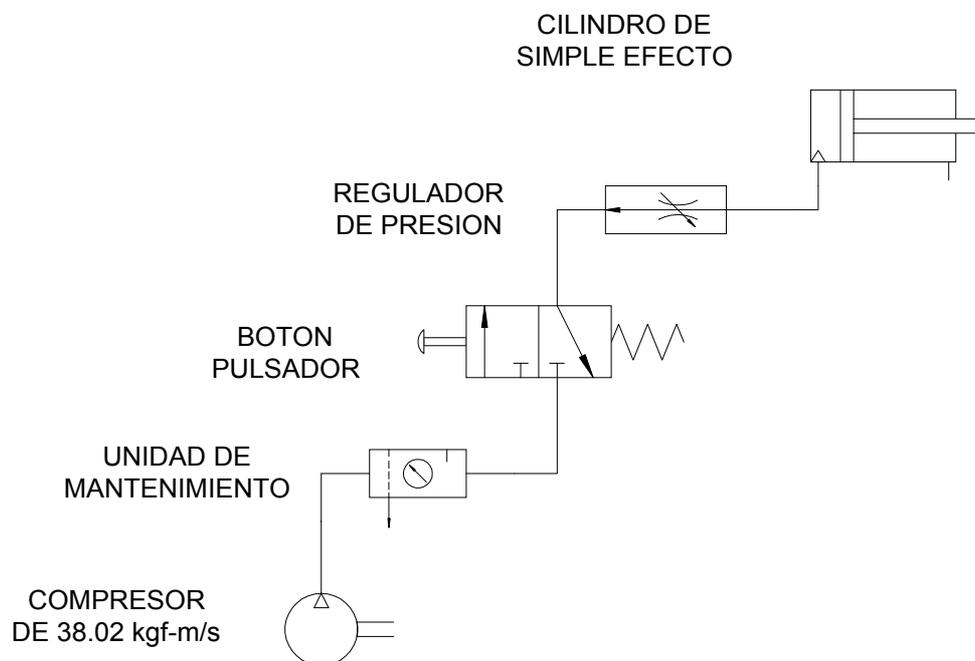


Figura 3.3. Diagrama del simulador de compactación neumático alimentado por un compresor.

3.4.2 Preparación de las muestras de suelo y el proceso de compactación en laboratorio.

El proceso de la compactación de los suelos se llevará a cabo en el laboratorio de Fluidica. Primero se coloca el cilindro sobre una base de papel (capacillos) para tener mejor facilidad en el manejo de los cilindros y se pesa en una balanza de una precisión de 0.01g, luego se llena el cilindro con suelo de texturas (arena, limo, arcilla) y diferente contenido de humedad hasta llenar completamente el cilindro (98.175 cm^3) y se pesa nuevamente, enseguida se colocan los cilindros que contienen las muestras de suelo en una placa guía (ranura que se encuentra exactamente por debajo de la caída del pistón) aplicándole una energía de compactación definida, sufriendo enseguida cada una de las muestras el efecto de compactación (reducción de altura) el cual será medido con un micrómetro, teniendo en cuenta que la medición se realizara después del rebote del suelo.

Luego de ser medido cada una de las muestras, los cilindros serán llevados al laboratorio de Física de suelos para ser secadas en una estufa por 24 h a 105°C y se deja enfriar a temperatura ambiente para ser pesados nuevamente. Con los datos obtenidos anteriormente se utilizaran para calcular el porcentaje (%) de humedad a la que se encuentra cada una de las muestras en el momento de ser compactados.

Este procedimiento se repite para cada una de las series de muestras de los sitios en estudio.

5.3 Quinta etapa. Cálculo de los resultados en las pruebas de laboratorio.

5.3.1 Densidad aparente.

Para calcular la densidad aparente del suelo cada una de las muestras se llevó al laboratorio para ser secadas en una estufa por 24 h a 105°C posteriormente se pesaron en una balanza de precisión de 0.001g y se calculó por medio de la siguiente expresión:

$$DAS = \frac{PSS}{(3.1416 * R^2 * L)}$$

Donde:

DAS: Densidad aparente del suelo en (g/cm³)

PSS: Peso del suelo seco en (g)

R: Radio del cilindro metálico en (cm)

L: Altura del cilindro metálico en (cm)

5.3.2 Porosidad del suelo.

Conociendo la densidad aparente del suelo y el peso del suelo seco se procedió a calcular el % de porosidad mediante la siguiente expresión:

$$P = \left(1 - \frac{Da}{2.6}\right) \times 100$$

Donde:

P = Porosidad expresada en %

D_a = Densidad aparente en g / cm³ ó kg / m³

D_r = Densidad de partículas en g / cm³ ó kg / m³

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

1.1. Identificación de los principales tipos de suelos en las regiones donde se practica la agricultura bajo riego en el estado de Coahuila.

La información que se encontró en las cartas de uso potencial del suelo y edafológico sobre las características y tipo de suelo de los sitios donde se practica la agricultura bajo riego en el estado de Coahuila son los siguientes.

Cuadro 4.1. Textura de los suelos de las áreas agrícolas de riego en el estado de Coahuila.

Municipios:	Sitio numero	profundidad (cm)	Textura (%)			% de materia orgánica
			Arcilla	Limo	Arena	
Arteaga	1	0-38	16	26	58	1.2
Ramos Arizpe	2	0-20	18	32	50	2
Saltillo	3	0-43	16	28	54	1.4
Torreón	4	0-30	32	40	28	1.9
Sabinas	5	0-24	24	32	44	1.6

(Mapa INEGI, 1982).

4.2. Selección de sitios para la toma de muestras de suelo similares en textura a las identificadas en las áreas de riego.

4.2.1 Campo Experimental Buenavista.

El campo experimental donde se ubican los sitios de levantamiento de muestras de suelo similares a los de las áreas de riego identificadas en la cartografía se encuentra ubicada en la exhacienda de Buenavista, localizada a 7 km al sur de la ciudad de Saltillo, en las coordenadas 100° 59'57" longitud oeste y 25°23'42" latitud norte, a una altitud de 1743 msnm dentro del campo experimental cada sitio se localiza como sigue: "Bajío de la UAAAN. 200 m al sur de la estación San Juan, al centro del Bajío, Aprox. a 600 m. de la "Gloria" rumbo sureste (en dirección al rastro), 500 m al sur este del rastro municipal, A 1750 m al sur este de la Gloria)" de la UAAAN.

4.2 Características de los sitios experimentales a evaluar.

Cuadro 4.2. Texturas de los suelos de las áreas agrícolas representativas en la "UAAAN" Valdés, (1985).

Sitios:	Perfil Numero	profundidad en cm.	Textura %		
			Arcilla	Limo	Arena
Estación San Juan	1	0-38	16	26	58
1750 mts. Al S E de la gloria	2	0-20	18	30	50
Vivero	3	0-43	16	28	56
Centro del Bajío	4	0-30	32	42	28
Rastro Municipal	5	0-24	24	32	44

En el cuadro 4.2. Nos muestra que las texturas de suelo del campo experimental (UAAAN) tienen características similares a las del cuadro 4.1 esto significa que podemos tomar las muestras a procesar en laboratorio.

4.3 Determinación del límite inferior de plasticidad (LIP) y establecimiento del rango de humedades para la prueba en laboratorio.

En base a los datos obtenidos en laboratorio para calcular el límite inferior de plasticidad cuadro 4.3 se observan las otras cinco humedades mas por debajo del LIP para cada sitio en estudio y con los datos obtenidos por el método gravimetrico se calcularon los gramos de agua que le corresponde para cada humedad (%).

Cuadro 4.3. Valores de (LIP) y Rango de Humedad para cada sitio en estudio.

Estación San Juan	Humedad (%)	16	18	20	22	24	* 26
	gr de Agua	80	90	100	110	120	130
Centro del Bajío	Humedad (%)	17	19	21	23	25	* 27
	gr de Agua	85	95	105	115	125	135
Vivero	Humedad (%)	24	26	28	30	32	* 34
	gr de Agua	120	130	140	150	160	170
Rastro	Humedad (%)	34	36	38	40	42	* 44
	gr de Agua	170	180	190	200	210	220
1750m al SE de la Gloria	Humedad (%)	30	32	34	36	38	* 40
	gr de Agua	150	160	170	180	190	200

* Limite inferior de plasticidad

4.4. Selección para la aplicación de cargas en distintas humedades de muestras de suelo.

Con el fin de simular las cargas que el suelo recibe al momento de las operaciones de labranza. Se seleccionó un rango de cinco presiones por encima de la presión que los tractores ejercen en posición estática. Ya que en forma dinámica al momento de la labor estas presiones son superadas a la carga con solo el peso del tractor e implemento.

Los datos que se muestran en cuadro 4.4 se obtuvo conociendo el área de la huella que ocupa la llanta en el suelo y el peso del tractor con implemento (adelante y atrás).

Cuadro 4.4. Presión obtenida en base al peso y área de contacto de los neumáticos del tractor en forma estática.

Modelo	Presión mínima			Presión máxima		
	kg/cm ²	lb/pulg ²	kPa	kg/cm ²	lb/pulg ²	kPa
5010 (NH)	0.52	7.4	50.98	0.8	11.38	78.43
6810 (NH)	0.64	9.1	62.75	0.98	13.94	96.08
2300 (JD)	0.61	8.7	59.8	0.93	13.23	91.18

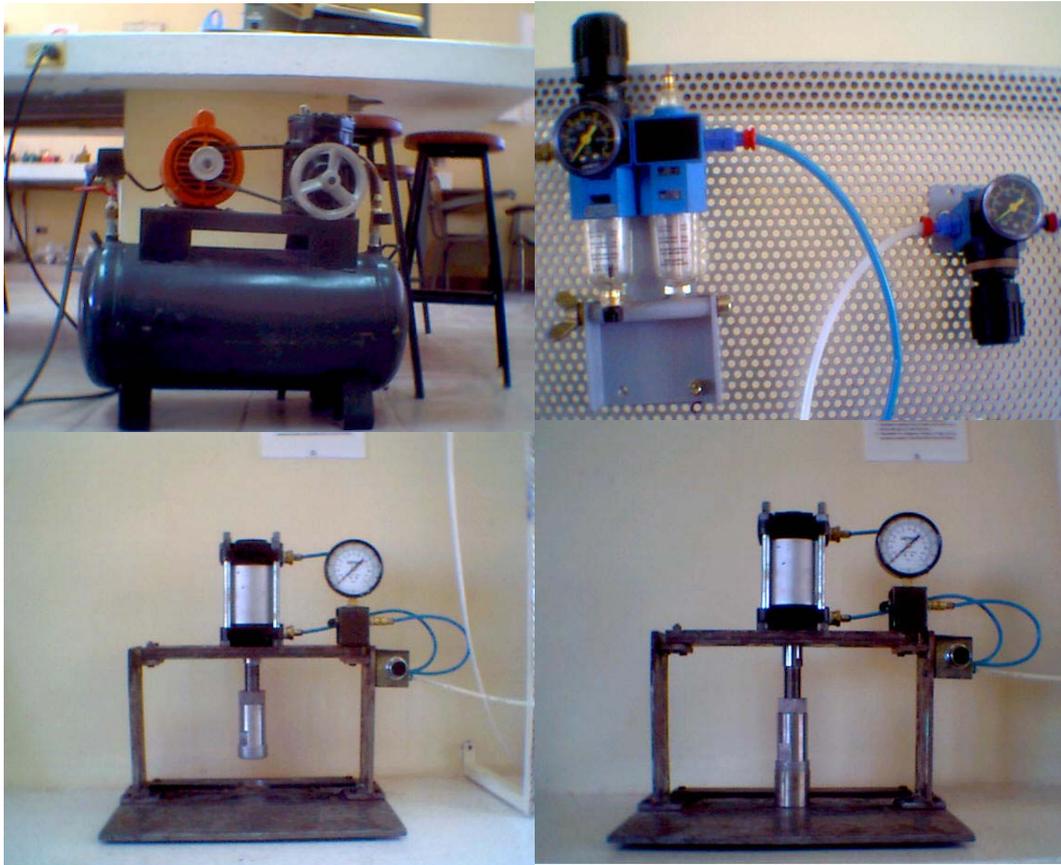
El cuadro 4.5 nos muestra los valores de las presiones en (kg/cm² y lb/pulg²) que se aplicaron en las distintas muestras de suelo a diferentes humedades, considerando que los datos obtenidos en el cuadro 4.4 se tomaron como referencia para poder considerar presiones mayores y así poder llevar a cabo el experimento de compactación.

Cuadro 4.5. Valores de la fuerza aplicada a cada una de las muestras de suelo.

kPa	presión del aire en:	
	kg/cm ²	lb/pulg ²
200	0.77	10.95
400	1.57	22.33
600	2.36	33.57
800	3.16	44.95
1000	3.96	56.33

El cuadro 4.5 nos muestra los valores en (kg/cm² y lb/pulg²) con los que se va a trabajar en laboratorio en las diferentes humedades de muestras de suelo.

Figura 4.1. Simulador de compactación neumático alimentado por un compresor.

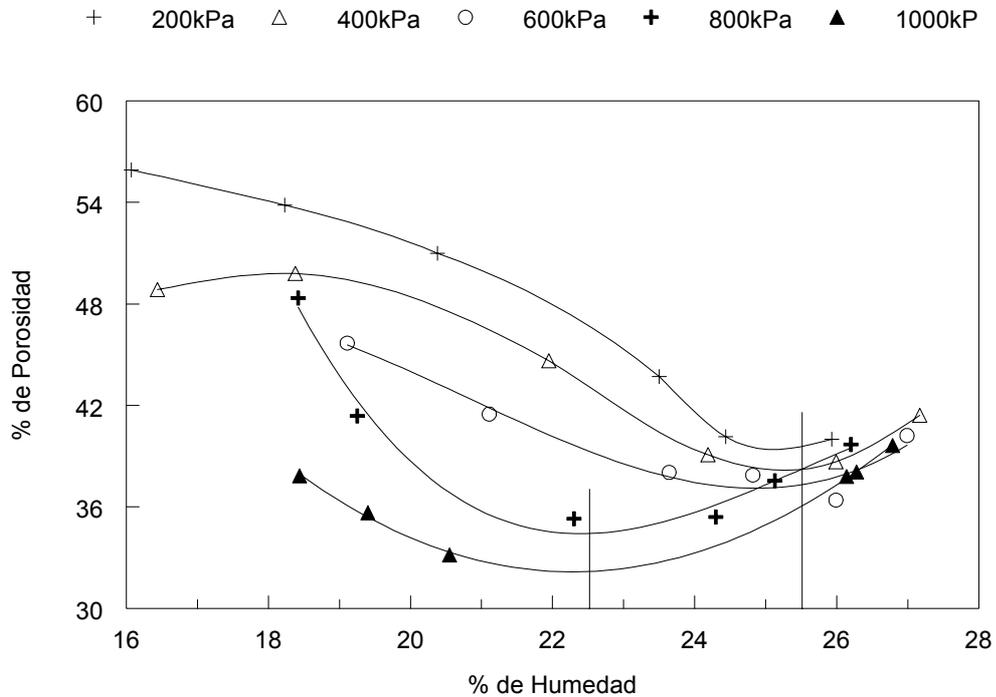


El equipo consiste en un compresor de medio caballo de fuerza (38.02kgf-m/s) que alimenta a la prensa, el aire pasa por dos reguladores de presión. El primero se regula a 70 lb mientras que el segundo hace el ajuste mas fino de la presión requerida con la cual trabajara la prensa.

Nota: El peso del pistón y el vástago se desprecia debido al efecto de fricción.

Resultados obtenidos en laboratorio.

Figura 4.2. Relación entre humedad, presión y porosidad del suelo en el sitio (estación San Juan) con textura migajón arenoso.



En la figura 4.2. Se puede observar que para las presiones a las cuales fue sometido el suelo, las curvas tienden a bajar (pérdida de porosidad) conforme se incrementa la humedad y la presión. Hasta llegar a un punto donde el suelo al ser sometido a cualquier presión tiende a subir nuevamente. Esto se debe a que en los pocos poros que queda en el suelo se encuentra lleno de agua, por lo que esta no se puede comprimir totalmente lo que hace que ejerzan una reacción igual a la presión que está siendo sometida. Cabe señalar que cuando se da este proceso el suelo pierde todas sus propiedades estructurales y se compacta.

Este análisis es el mismo para los otros tipos de suelo en estudio.

En la relación que existe entre porosidad, presión y humedad en la figura 4.2. Mediante la simulación realizadas en laboratorio se puede observar que el valor de porosidad (55.92 %), con una humedad de (16.07 %) se presenta cuando el suelo es sometido a fuerzas externas de 200 kPa. A medida que se incrementa la fuerza a (1000 kPa) y la humedad en el suelo, la porosidad tiende a disminuir drásticamente (33.16 %) a una humedad de (22.5 %) e incrementa la densidad aparente de los suelos, esto quiere decir que se comenzaría a formar un encostramiento como consecuencia directa del paso de maquinaria e implementos de labranza, originando problemas para la germinación de la plántula.

También se puede señalar que cuando en este tipo de suelo es sometido a (200,400 y 600 kPa), se puede trabajar hasta un 25.5 % que es límite de humedad el cual el suelo se comenzaría a compactar por lo que lo mas recomendable seria trabajar en uno o dos valores porcentuales por debajo de este límite.

Por otro lado si el suelo es sometido a fuerzas de (800 y 1000 kPa), únicamente podríamos trabajar hasta un 22.5 % de humedad en el suelo ya que si continuamos trabajando a humedades más altas de este rango si tendríamos problemas de compactación.

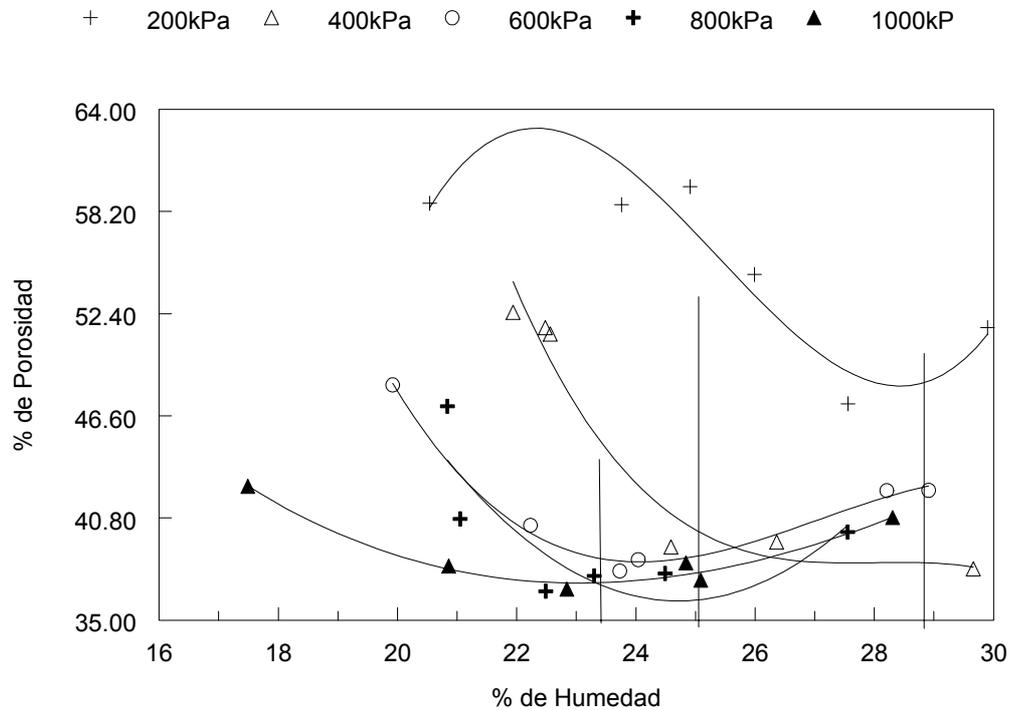
Ahora si se tiene un tractor grande y tenemos que trabajar a una humedad más alta en este caso (25.5 %), para no tener problemas de compactación y podamos trabajar a la misma humedad con la que trabaja un tractor liviano, se puede aumentar el área de contacto rueda-suelo (disminuyendo la presión de inflado).

Esto no quiere decir que si se tiene un tractor liviano de 1500 kg de peso que otro de 4,000 kg no se va a compactar el suelo, si no que dependerá de la presión de sus neumáticos y el área de contacto que tenga la rueda en el suelo.

De lo anterior podemos deducir que la investigación obtenida es válida únicamente para suelos que tengan las características de textura similares a las del municipio de Arteaga (migajón arenoso).

Resultados obtenidos en la segunda prueba en laboratorio.

Figura 4.3. Relación entre humedad, presión y porosidad del suelo en el sitio (Centro del Bajío) con textura migajón arcilloso.



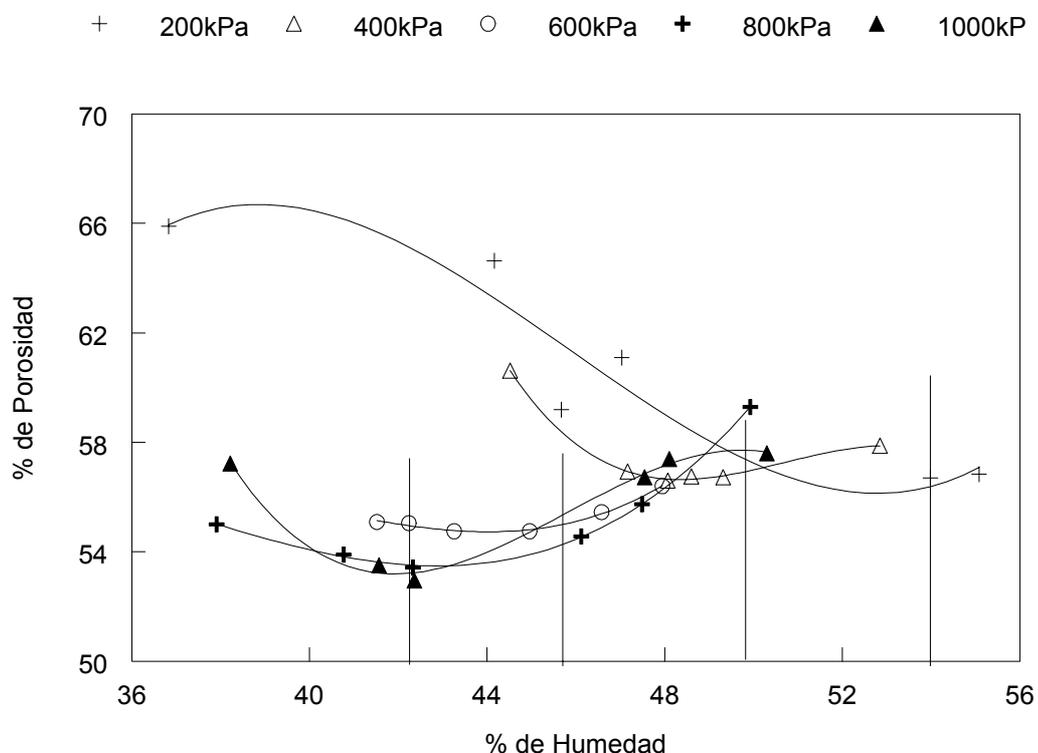
En la figura 4.3. Se puede observar que los valores de porosidad (60 %) a una humedad de (20.54 %) se encuentran cuando el suelo está siendo sometido a fuerzas de (200 kPa) y el valor mínimo de porosidad (36.65%) con una humedad de (22.5 %) se encuentra cuando el suelo es sometido a una fuerza de 1000 kPa.

Esto quiere decir que cuando el suelo está siendo manipulado con una fuerza de 200 kPa a la humedad de (20.5 %), el suelo no tiene ningún problema de compactación si no hasta que llegue a un (29 %) de humedad aproximadamente. Mientras que cuando el suelo es sometido a una fuerza de (1000 kPa) a la humedad de (22.5 %) la porosidad del suelo es la mínima, por lo que el agricultor no deberá trabajar a mayor humedad ya que el suelo comenzaría a tener problemas de compactación. La solución que tendría el agricultor será la de disminuir la presión de las neumáticas para aumentar el área de contacto.

De lo anterior podemos deducir que la investigación obtenida es válida únicamente para suelos que tengan las características de textura similares a las del municipio de Torreón (migajón arcilloso).

Resultados obtenidos en la tercera prueba en laboratorio.

Figura 4.4. Relación entre humedad, presión y porosidad del suelo en el sitio (el Rastro) con textura Migajón.



En la figura 4.4. Se puede mostrar que los valores de porosidad (65.9 %) con una humedad de (36.86 %), se encuentra cuando el suelos están siendo sometido por fuerzas externas de (200 kPa), mientras que los valores mínimos de porosidad (52.95 %) con una humedad de (42.36 %) se encuentran cuando el suelo es sometido a una fuerza de (1000 kPa).

Los valores obtenidos en la figura 4.4 nos permite analizar por separado cada una de las presiones a las que fue sometido este tipo de suelo (200, 400, 600, 800 y 1000 kPa) respectivamente.

En este suelo el agricultor podrá realizar las labores con tractores livianos (200 kPa), hasta un 54 % de humedad, sin tener problemas de compactación.

Para que el suelo pueda soportar 400 kPa debe ser trabajado hasta un 50 % de humedad para que el suelo no pierda sus propiedades.

Ahora si el suelo soporta 600 kPa deberá ser trabajado como máximo hasta un 46 % de humedad.

Mientras que con tractores pesados (800 y 1000 kPa), únicamente podrá trabajar hasta un (42.36 %) de humedad aproximadamente.

La sugerencia es que el agricultor que tenga un tractor grande y pueda realizar sus labores agrícolas sin riesgo de compactación tendrá que disminuir la presión de los neumáticos para tener mas área de contactó con el suelo.

De lo anterior podemos decir que la investigación obtenida es válida únicamente para suelos que tengan las características de textura similares a las del municipio de Sabinas (Migajón).

Como norma general digamos que todos los suelos se compactan más a medida que aumenta su grado de humedad.

Como dice Miyasato “recordemos que la tierra no es nuestra, ni fue de nuestros antecesores sino que la hemos tomado prestada de nuestros hijos y los hijos de nuestros hijos, por eso debemos de devolverla sino igual o mejor que las condiciones en que la hemos recibido”

I. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones.

- ❖ En base a los resultados obtenidos podemos decir que la compactación del suelo se va incrementando a medida que aumenta la humedad y presión mecánica de la maquinaria e implementos pesados de labranza.

- ❖ En base a los objetivos establecidos al inicio del proyecto se puede concluir que para un suelo de textura migajón arenoso los límites de humedad a la que se deben realizar las labores con maquinaria (liviano y pesado), haciendo los ajustes correspondientes es hasta un 25.5 %, para un suelo de textura migajón arcillosa es de 29 % de humedad, mientras que para un suelo de tipo migajón es de 54 % de humedad.

- ❖ En base a la hipótesis establecida anteriormente, decimos que es posible prevenir el problema de compactación, ya que la presión que ejercen los tractores más comunes en la región se encuentra entre 50 kPa (mínimo) y 100 kPa (máximo), y las pruebas realizadas en laboratorio fueron con presiones por encima de esa referencia (citadas anteriormente), por medio de pruebas sencillas estableciendo así los límites a las que pueden ser trabajadas cada tipo de suelo sin sufrir compactación.

Recomendaciones.

- ❖ Dentro del aspecto de recomendaciones se sugiere que en base a los datos obtenidos en laboratorio, se realizaran pruebas en campo para verificar las pruebas que se hicieron en laboratorio, y de ser así se continúe realizando a futuro estudios de compactación en laboratorio con las demás clases texturales de los suelos agrícolas.
- ❖ Otra de las recomendaciones sería la de contar con un mejor equipo para continuar realizando estudios a futuro, ya que con el que contamos en el laboratorio de Fluidica, se pierde mucho tiempo al momento que se esta cambiando y regulando las presiones. También con otro manómetro con mayor precisión en la lectura, ya que con este no se tiene una precisión exacta.

I. LITERATURA CITADA

1. Alakukku, L. 1996. Persistence of soil compaction due to high axle load traffic. Short term effects on the properties of clay and organic soils. *Soil & Tillage Research* 37: 211-222.
2. Alakukku, L. 1997. Long-Term soil compaction due to high axle load traffic. Ed. Agricultural Research Centre of Finland. Jokioinen, Finland, 55 p.
3. Amezquita, E. 1984. Curso práctico sobre fertilidad, análisis de suelos y recomendaciones de fertilizantes. Cagua, Ven. FUSAGRI. 1-8.
4. Arshad, M.A. (1999) Tillage and soil quality: tillage practices for sustainable agriculture and environmental quality in different agroecosystems. *Soil and Tillage Research* 53:1-2.
5. Baver, L. 1963. *Soil Physics*. Third Ed. John Willey and Son N.Y. 489p.
6. Benites, J.R. y C.S. OFORI. 1993. Crop production through conservation effective tillage in the tropics. *Soil Tillage Res.* 27:9-33.
7. Botta, G. 2000. Distribución sub-superficial de la compactación inducida por el tráfico agrícola. Tesis Doctoral, Dpto. de Tecnología, Universidad Nacional de Luján, Luján, Argentina 201 p.
8. Botta G. Dagostino, 2001. "Compactación del suelo producido por el tráfico agrícola".
9. Blake, G.R.; W.W. Nelson and R.R. Allmaras. 1976. Persistence of subsoil compaction in a mollisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40:943-948.

10. Canilla E. C. y V.M. Salokhe, 2002. A decision support system for compaction assessment in agricultural soil. *Soil & Tillage Research* 65, 221-230.
11. Florentino, A. 1989. Efecto de la compactación sobre las relaciones hídricas en suelos representativos de la Colonia Agrícola de Turén (Edo. Portuguesa). Su incidencia agronómica. UCV. Facultad de Agronomía. Tesis Doctoral. Postgrado en Ciencias del Suelo. 207 p.
12. Gaultney, L.; G.W. Krutz; G.W. Steinhardt and J.B. Liljedahl. 1982. Effect of subsoil compaction on corn yield. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 25:563-569.
13. Gavande, S. 1973. Física de suelos. Principios y aplicaciones. México. Ed. Limusa-Willey S.A. 351 p.
14. Hakansson, 1994. Effect of high axle-load traffic on subsoil compaction and crop yields in humid regions with annual freezing. *Soil Tillage Res.* 10:259-268.
15. INEGI. 2002. Anuario Estadístico del Estado de Coahuila. INEGI. Aguascalientes, Ags, México, pp.
16. Jiménez Salas, 1997. "Tierras y Rocas Compactadas. Editores Técnicos Asociados, Oldeman et al. 1991.
17. Kezdi, A. 1975. Manual de la mecánica de suelos. Hungría. Universidad Técnica de Budapest. 264 p.
18. Kramer, P.J. 1983. *Water Relations of Plants*. Academic Press, INC. (London) LTD. 489 p.
19. Lal, R.(2000) Soil management in the developing countries. *Soil Science* 165:57-72. McGarry, D(2001). *Tillage and Soil Compaction*.
20. Malagon, D. 1976. Física de suelos. Bogotá, Cali, Col. IGAC. 622p.

21. Materechera, S.A.; A.M. Alston; J.M. Kirby and A.R. Dexter. 1993. Field evaluation of laboratory techniques for predicting the ability of roots to penetrate strong soil and of the influence of roots on water sorptivity. *Plant and Soil* 149:149-158.
22. Mc Garry, D. (2001) Tillage and soil compaction. *Conservation Agriculture: A Worldwide Challenge*, pp. 281-191. .Eds: L. García Torres, J. Benites, A. Martínez Vilela. Spain: FAO-ECAF.
23. Milchunas, D.G.; C.A. Lee; W.K. Lauenroth and D.P. Coffin. 1992. A comparison of ^{14}C , ^{86}Rb , and total excavation for determination of root distributions of individual plants. *Plant and Soil* 144:125-132.
24. Montenegro, H. y D. Malagon. 1990. *Propiedades físicas de los suelos*. Bogotá, Col. IGAC. 813 p.
25. Muñoz araque. Rodrigo. 1988. *Modulo de suelo, fascículos I y II*. Medellín: Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid. 182 p.
26. Narro. F. E: 1994. *Física de suelos con enfoque agrícola*. Editorial Trillas. DF, México.
- 27 Oldeman, L.R. 1991. *World map of the status of human-induced soil degradation, and explanatory note (2nd, Edition)*, Global assessment of soil degradation (GLASOD), ISRIC; wageningen, the netherlands.
28. Ortiz, Cañabate J. 1989. *Técnicas de la Mecanización Agraria*. Edición Mundi-prensa, Madrid. España.
29. PLA, I. 1977. *Metodología para caracterización física con fines de diagnóstico de problemas de manejo y conservación de suelos en condiciones tropicales* .Maracay, Ven. UCV-FAGRO. 112 p.
30. PLA, I. 1995. *Efecto de los sistemas de labranza en la degradación y productividad de los suelos*. Guanare, Ven. *Memorias de la II Reunión de la Red Latinoamericana de Labranza Conservacionista*. 366p.

31. Russell, E.W. 1973. Soil Conditions and plant growth. Décima edición. Longman Group Limited, London. 849 p.
32. Sánchez Quiroga, 2003. "En busca de una tomografía de los suelos" Shafer et al., 1993.
33. Soane, B.D. and van Ouwerkerk, C. (1994) Soil compaction problems in world agriculture .In Soil compaction in crop production, pp. 1-21. Eds B.D.
34. Van Noordwijk, M.; G. Brouwer and K. Harmanny. 1993. Concepts and methods for studying interactions of roots and soil structure. Geoderma 56:351-375.
35. http://www.euskadi.net/vima_suelo/compactacion_c.htm
36. <http://www.cetabol.cotasnet.com.bo/rcsp/10/miya.pdf>

A.1.

Cuadro1.1. Análisis de datos de la prueba de suelo "Estación San Juan" a (200Kpa)

Estación San Juan "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	Peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
16	1	295	87.4	192.5	0.955	178.4	91	15.49	4.05	98.175	79.42	0.93	1.15	64.35	55.93
	2	293	86.7	182.5	1.23	169.3	82.6	15.98	3.77	98.175	74.02	0.84	1.12	67.64	57.08
	3	288	83.7	183.5	1.3	169.2	85.5	16.73	3.70	98.175	72.65	0.87	1.18	66.50	54.74
18	1	289	87.6	184.6	1.34	169.6	82	18.29	3.66	98.175	71.86	0.84	1.14	67.88	56.11
	2	320	82.7	179.6	1.62	164.7	82	18.17	3.38	98.175	66.37	0.84	1.24	67.88	52.48
	3	286	84.7	182.7	1.55	167.6	82.9	18.21	3.45	98.175	67.74	0.84	1.22	67.52	52.93
20	1	291	85.6	173.9	1.93	159	73.4	20.30	3.07	98.175	60.28	0.75	1.22	71.24	53.17
	2	292	84.6	170.2	2.3	155.6	71	20.56	2.70	98.175	53.01	0.72	1.34	72.18	48.49
	3	290	81	170.6	2	155.5	74.5	20.27	3.00	98.175	58.91	0.76	1.26	70.81	51.36
22	1	45	84.1	163.5	2.71	148.4	64.3	23.48	2.29	98.175	44.96	0.65	1.43	74.81	45.00
	2	287	84	157	2.98	143.2	59.2	23.31	2.02	98.175	39.66	0.60	1.49	76.81	42.59
	3	46	87.6	173.2	2.6	156.8	69.2	23.70	2.40	98.175	47.12	0.70	1.47	72.89	43.52
24	1	49	86.7	166	2.82	150.5	63.8	24.29	2.18	98.175	42.80	0.65	1.49	75.01	42.67
	2	47	85.3	172.5	2.72	155.2	69.9	24.75	2.28	98.175	44.77	0.71	1.56	72.62	39.95
	3	48	84	170	2.82	153.2	69.2	24.28	2.18	98.175	42.80	0.70	1.62	72.89	37.82
26	1	51	85.7	172.4	2.83	154.7	69	25.65	2.17	98.175	42.61	0.70	1.62	72.97	37.71
	2	50	85	175.7	2.7	156.9	71.9	26.15	2.30	98.175	45.16	0.73	1.59	71.83	38.77
	3	52	84.2	179.2	2.54	159.6	75.4	25.99	2.46	98.175	48.30	0.77	1.56	70.46	39.96

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro1.2. Análisis de datos de la prueba de suelo "Estación San Juan" a (400Kpa)

Estación San Juan "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	Peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
16	1	53	86.3	190.2	1.3	175.5	89.2	16.48	3.7	98.175	72.65	0.91	1.23	65.05	52.78
	2	54	86.7	182.9	2.1	169.2	82.5	16.61	2.9	98.175	56.94	0.84	1.45	67.68	44.27
	3	55	83	173.9	2.02	161.2	78.2	16.24	2.98	98.175	58.51	0.80	1.34	69.36	48.60
18	1	56	87.6	183.7	1.64	168.5	80.9	18.79	3.36	98.175	65.97	0.82	1.23	68.31	52.84
	2	57	84.5	182.9	1.84	167.8	83.3	18.13	3.16	98.175	62.05	0.85	1.34	67.37	48.36
	3	58	84.4	180.4	1.93	165.6	81.2	18.23	3.07	98.175	60.28	0.83	1.35	68.19	48.19
20	1	59	84.5	175.5	2.32	159.1	74.6	21.98	2.68	98.175	52.62	0.76	1.42	70.77	45.47
	2	60	84.3	174.1	2.43	158.3	74	21.35	2.57	98.175	50.46	0.75	1.47	71.01	43.60
	3	61	85	176.4	2.35	159.6	74.6	22.52	2.65	98.175	52.03	0.76	1.43	70.77	44.86
22	1	62	85.8	163.7	2.93	148	62.2	25.24	2.07	98.175	40.64	0.63	1.53	75.63	41.14
	2	63	79.7	161.3	2.94	145.7	66	23.64	2.06	98.175	40.45	0.67	1.63	74.14	37.24
	3	64	86.1	173.3	2.74	156.6	70.5	23.69	2.26	98.175	44.38	0.72	1.59	72.38	38.90
24	1	66	84.8	168.4	2.83	150.8	66	26.67	2.17	98.175	42.61	0.67	1.55	74.14	40.42
	2	67	84.4	166.8	2.91	150.4	66	24.85	2.09	98.175	41.04	0.67	1.61	74.14	38.14
	3	68	84.7	180.8	2.62	160.7	76	26.45	2.38	98.175	46.73	0.77	1.63	70.23	37.45
26	1	70	83.6	199.8	1.92	175.9	92.3	25.89	3.08	98.175	60.48	0.94	1.53	63.84	41.30
	2	71	87.9	215.1	1.9	188.4	100.5	26.57	3.1	98.175	60.87	1.02	1.65	60.63	36.50
	3	42	83.9	188.3	2.29	164.8	80.9	29.05	2.71	98.175	53.21	0.82	1.52	68.31	41.52

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro1.3. Análisis de datos de la prueba de suelo "Estación San Juan" a (600Kpa)

Estación San Juan "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
16	1	43	86.5	178.9	2.24	165	78.5	17.71	2.76	98.175	54.19	0.80	1.45	69.25	44.29
	2	78	87.1	179.3	2.11	164.4	77.3	19.28	2.89	98.175	56.75	0.79	1.36	69.72	47.61
	3	79	87.7	181.7	2.21	165.8	78.1	20.36	2.79	98.175	54.78	0.80	1.43	69.40	45.17
18	1	283	87.4	179.7	2.45	164	76.6	20.50	2.55	98.175	50.07	0.78	1.53	69.99	41.16
	2	44	83.9	176.5	2.43	160.3	76.4	21.20	2.57	98.175	50.46	0.78	1.51	70.07	41.77
	3	132	84.8	177	2.46	160.6	75.8	21.64	2.54	98.175	49.87	0.77	1.52	70.30	41.54
20	1	156	83.9	178.4	2.51	160.9	77	22.73	2.49	98.175	48.89	0.78	1.57	69.83	39.43
	2	145	84.5	174.7	2.71	157	72.5	24.41	2.29	98.175	44.96	0.74	1.61	71.60	37.98
	3	153	84.4	170.8	2.84	154.2	69.8	23.78	2.16	98.175	42.41	0.71	1.65	72.65	36.70
22	1	284	84.4	184.5	2.5	163.9	79.5	25.91	2.5	98.175	49.09	0.81	1.62	68.85	37.71
	2	282	84.1	177.9	2.61	159.6	75.5	24.24	2.39	98.175	46.93	0.77	1.61	70.42	38.12
	3	69	83.9	173.9	2.72	156.3	72.4	24.31	2.28	98.175	44.77	0.74	1.62	71.64	37.80
24	1	144	84.4	187.1	2.5	166.6	82.2	24.94	2.5	98.175	49.09	0.84	1.67	67.80	35.59
	2	74	80.8	173.4	2.74	154.1	73.3	26.33	2.26	98.175	44.38	0.75	1.65	71.28	36.47
	3	76	83.7	177.2	2.7	157.5	73.8	26.69	2.3	98.175	45.16	0.75	1.63	71.09	37.15
26	1	80	84.4	194.6	2.2	172.1	87.7	25.66	2.8	98.175	54.98	0.89	1.60	65.64	38.65
	2	138	93.5	202.2	2	177.6	84.1	29.25	3	98.175	58.91	0.86	1.43	67.05	45.09
	3	150	84.3	195.1	2.27	172.2	87.9	26.05	2.73	98.175	53.60	0.90	1.64	65.56	36.93

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro1.4. Análisis de datos de la prueba de suelo "Estación San Juan" a (800Kpa)

Estación San Juan "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
16	1	127	80.8	175.2	2.05	160.1	79.3	19.04	2.95	98.175	57.92	0.81	1.37	68.93	47.34
	2	75	83.6	177	2	162.9	79.3	17.78	3	98.175	58.91	0.81	1.35	68.93	48.22
	3	155	85.2	173.8	2.1	160	74.8	18.45	2.9	98.175	56.94	0.76	1.31	70.70	49.48
18	1	159	79.8	171.9	2.06	157	77.2	19.30	2.94	98.175	57.73	0.79	1.34	69.76	48.56
	2	146	87.5	184.1	2.47	168.5	81	19.26	2.53	98.175	49.68	0.83	1.63	68.27	37.29
	3	151	79.9	171.2	2.57	156.5	76.6	19.19	2.43	98.175	47.71	0.78	1.61	69.99	38.25
20	1	294	86.1	172.2	2.9	156.2	70.1	22.82	2.1	98.175	41.23	0.71	1.70	72.54	34.61
	2	133	83.9	172.8	2.77	156.6	72.7	22.28	2.23	98.175	43.79	0.74	1.66	71.52	36.14
	3	285	87.2	175.5	2.81	159.7	72.5	21.79	2.19	98.175	43.00	0.74	1.69	71.60	35.15
22	1	134	83.5	176	2.79	158.1	74.6	23.99	2.21	98.175	43.39	0.76	1.72	70.77	33.88
	2	130	84.9	178.8	2.66	160.4	75.5	24.37	2.34	98.175	45.95	0.77	1.64	70.42	36.80
	3	135	84.6	180.5	2.66	161.6	77	24.55	2.34	98.175	45.95	0.78	1.68	69.83	35.54
24	1	125	87.6	185	2.56	165.4	77.8	25.19	2.44	98.175	47.91	0.79	1.62	69.52	37.54
	2	317	85	176	2.73	157.5	72.5	25.52	2.27	98.175	44.57	0.74	1.63	71.60	37.44
	3	140	86.6	175.5	2.76	157.9	71.3	24.68	2.24	98.175	43.98	0.73	1.62	72.07	37.65
26	1	77	83.8	189.4	2.34	167.9	84.1	25.56	2.66	98.175	52.23	0.86	1.61	67.05	38.07
	2	147	79.5	177.4	2.51	156.9	77.4	26.49	2.49	98.175	48.89	0.79	1.58	69.68	39.11
	3	137	87.6	199.1	2.03	175.7	88.1	26.56	2.97	98.175	58.32	0.90	1.51	65.49	41.89

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro1.5. Análisis de datos de la prueba de suelo "Estación San Juan" a (1000Kpa)

Estación San Juan "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
16	1	129	86.4	178.2	2.2	164.2	77.8	17.99	2.8	98.175	54.98	0.79	1.42	69.52	45.57
	2	73	79.4	168.9	2.25	155	75.6	18.39	2.75	98.175	54.00	0.77	1.40	70.38	46.15
	3	128	88	178.4	2.1	164	76	18.95	2.9	98.175	56.94	0.77	1.33	70.23	48.67
18	1	143	84.4	174.3	2.71	159.8	75.4	19.23	2.29	98.175	44.96	0.77	1.68	70.46	35.50
	2	136	83.8	172.1	2.76	157.7	73.9	19.49	2.24	98.175	43.98	0.75	1.68	71.05	35.38
	3	160	83.8	172.7	2.72	158.2	74.4	19.49	2.28	98.175	44.77	0.76	1.66	70.85	36.08
20	1	122	85.1	173.6	2.85	160.6	75.5	17.22	2.15	98.175	42.22	0.77	1.79	70.42	31.21
	2	72	87	171	2.91	155.5	68.5	22.63	2.09	98.175	41.04	0.70	1.67	73.16	35.80
	3	313	84.4	168.8	2.99	153.7	69.3	21.79	2.01	98.175	39.47	0.71	1.76	72.85	32.46
22	1	126	82.6	168.7	2.86	150.3	67.7	27.18	2.14	98.175	42.02	0.69	1.61	73.48	38.03
	2	123	84.5	180	2.59	160.7	76.2	25.33	2.41	98.175	47.32	0.78	1.61	70.15	38.07
	3	131	87.7	173.2	2.88	155.6	67.9	25.92	2.12	98.175	41.63	0.69	1.63	73.40	37.26
24	1	139	85.5	169.8	2.89	152.1	66.6	26.58	2.11	98.175	41.43	0.68	1.61	73.91	38.17
	2	314	84.3	177.2	2.68	158.1	73.8	25.88	2.32	98.175	45.55	0.75	1.62	71.09	37.69
	3	304	85.2	174.3	2.76	155.7	70.5	26.38	2.24	98.175	43.98	0.72	1.60	72.38	38.35
26	1	1	77.7	184.4	2.36	161.5	83.8	27.33	2.64	98.175	51.84	0.85	1.62	67.17	37.82
	2	154	84.9	183	2.5	162.6	77.7	26.25	2.5	98.175	49.09	0.79	1.58	69.56	39.12
	3	298	87.5	183	2.4	162.1	74.6	28.02	2.6	98.175	51.05	0.76	1.46	70.77	43.80

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

A.2.

Cuadro2.1. Analisis de datos de la prueba de suelo "centro del Bajío a (200Kpa)

Centro del Bajío de la "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
17	1	312	84	172.9	1.48	157.07	73.07	21.66	3.52	98.175	69.12	0.74	1.06	71.37	59.34
	2	302	84	173.4	1.44	159.08	75.08	19.07	3.56	98.175	69.90	0.76	1.07	70.59	58.69
	3	315	76.4	167.9	1.47	152.09	75.69	20.89	3.53	98.175	69.31	0.77	1.09	70.35	58.00
19	1	65	84.9	174.1	1.23	155.9	71	25.63	3.77	98.175	74.02	0.72	0.96	72.18	63.11
	2	141	85.3	173	1.67	156.01	70.71	24.03	3.33	98.175	65.38	0.72	1.08	72.30	58.41
	3	303	85.7	173.7	1.77	156.06	70.36	25.07	3.23	98.175	63.42	0.72	1.11	72.44	57.33
21	1	300	85.4	173	1.6	157.07	71.67	22.23	3.4	98.175	66.76	0.73	1.07	71.92	58.71
	2	305	83.7	174.7	1.49	155.07	71.37	27.50	3.51	98.175	68.92	0.73	1.04	72.04	60.17
	3	308	85.1	175	1.64	159.07	73.97	21.54	3.36	98.175	65.97	0.75	1.12	71.02	56.88
23	1	307	84.2	185.7	1.68	164.07	79.87	27.08	3.32	98.175	65.19	0.81	1.23	68.71	52.88
	2	310	86.8	191.8	1.16	169.07	82.27	27.63	3.84	98.175	75.40	0.84	1.09	67.77	58.03
	3	297	84.9	186.1	1.58	167.01	82.11	23.25	3.42	98.175	67.15	0.84	1.22	67.83	52.97
25	1	318	84.9	201.4	1.82	175.08	90.18	29.19	3.18	98.175	62.44	0.92	1.44	64.67	44.45
	2	149	85.5	187.3	1.71	166.4	80.9	25.83	3.29	98.175	64.60	0.82	1.25	68.31	51.83
	3	121	84.7	189	2.06	166.4	81.7	27.66	2.94	98.175	57.73	0.83	1.42	67.99	45.57
27	1	319	86.1	191.2	1.91	166.4	80.3	30.88	3.09	98.175	60.67	0.82	1.32	68.54	49.10
	2	296	87.4	186.5	1.28	164.7	77.3	28.20	3.72	98.175	73.04	0.79	1.06	69.72	59.30
	3	299	84.9	191.6	2.01	166.6	81.7	30.60	2.99	98.175	58.71	0.83	1.39	67.99	46.48

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro2.2. Análisis de datos de la prueba de suelo "centro del Bajío a (400Kpa)

Centro del Bajío de la "UAAAN"

% de Humedad	Repeticición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
17	1	157	84.4	173.4	2.13	157.4	73	21.92	2.87	98.175	56.35	0.74	1.30	71.40	50.18
	2	158	79.8	170.2	2.13	154.9	75.1	20.37	2.87	98.175	56.35	0.76	1.33	70.58	48.74
	3	56	87.7	176.4	1.61	159.5	71.8	23.54	3.39	98.175	66.56	0.73	1.08	71.87	58.51
19	1	124	84.7	173.7	1.7	155.9	71.2	25.00	3.3	98.175	64.80	0.73	1.10	72.11	57.74
	2	152	85.1	171.8	2.42	156.6	71.5	21.26	2.58	98.175	50.66	0.73	1.41	71.99	45.71
	3	309	87.3	175.4	2.07	160	72.7	21.18	2.93	98.175	57.53	0.74	1.26	71.52	51.40
21	1	148	87.9	173.3	2.28	156.8	68.9	23.95	2.72	98.175	53.41	0.70	1.29	73.01	50.38
	2	281	84.5	173.6	2.36	158.1	73.6	21.06	2.64	98.175	51.84	0.75	1.42	71.17	45.39
	3	142	88.1	176.8	1.63	160.4	72.3	22.68	3.37	98.175	66.17	0.74	1.09	71.68	57.98
23	1	316	86.1	177.8	2.57	160.4	74.3	23.42	2.43	98.175	47.71	0.76	1.56	70.89	40.11
	2	306	85.4	180.4	2.57	161.4	76	25.00	2.43	98.175	47.71	0.77	1.59	70.23	38.74
	3	311	84.1	179.5	2.57	160.2	76.1	25.36	2.43	98.175	47.71	0.78	1.59	70.19	38.66
25	1	62	86.1	196.7	2.16	173.7	87.6	26.26	2.84	98.175	55.76	0.89	1.57	65.68	39.58
	2	42	84.1	204.2	1.95	179	94.9	26.55	3.05	98.175	59.89	0.97	1.58	62.82	39.05
	3	147	79.7	189.3	2.18	166.5	86.8	26.27	2.82	98.175	55.37	0.88	1.57	65.99	39.71
27	1	66	85	195.2	2.62	170.1	85.1	29.49	2.38	98.175	46.73	0.87	1.82	66.66	29.96
	2	61	85.2	204.8	2	177.5	92.3	29.58	3	98.175	58.91	0.94	1.57	63.84	39.73
	3	160	83.9	196	1.98	170.2	86.3	29.90	3.02	98.175	59.30	0.88	1.46	66.19	44.02

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro2.3. Análisis de datos de la prueba de suelo "centro del Bajío a (600kPa)

Centro del Bajío de la "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
17	1	295	88	178.1	2.16	164.04	76.04	18.49	2.84	98.175	55.76	0.77	1.36	70.21	47.55
	2	284	84.6	175.8	2	160.03	75.43	20.91	3	98.175	58.91	0.77	1.28	70.45	50.75
	3	153	84.6	174.2	2.26	159.05	74.45	20.35	2.74	98.175	53.80	0.76	1.38	70.83	46.78
19	1	304	85.4	172.8	2.43	156.06	70.66	23.69	2.57	98.175	50.46	0.72	1.40	72.32	46.14
	2	122	85.3	172.3	2.98	157.03	71.73	21.29	2.02	98.175	39.66	0.73	1.81	71.90	30.44
	3	156	84.1	170.5	2.49	155.09	70.99	21.71	2.51	98.175	49.28	0.72	1.44	72.19	44.60
21	1	74	81	172.7	2.69	154.09	73.09	25.46	2.31	98.175	45.36	0.74	1.61	71.37	38.02
	2	131	88.1	175.3	2.73	159.05	70.95	22.90	2.27	98.175	44.57	0.72	1.59	72.20	38.78
	3	51	85.8	174.5	2.77	158.01	72.21	22.84	2.23	98.175	43.79	0.74	1.65	71.71	36.57
23	1	136	83.9	169.8	2.83	153.05	69.15	24.22	2.17	98.175	42.61	0.70	1.62	72.91	37.58
	2	47	85.4	172.6	2.78	155.04	69.64	25.22	2.22	98.175	43.59	0.71	1.60	72.72	38.55
	3	139	85.5	172	2.73	156	70.5	22.70	2.27	98.175	44.57	0.72	1.58	72.38	39.16
25	1	150	84.5	175.9	2.63	156.08	71.58	27.69	2.37	98.175	46.53	0.73	1.54	71.96	40.84
	2	294	86.3	174.3	2.63	155.04	68.74	28.02	2.37	98.175	46.53	0.70	1.48	73.07	43.19
	3	72	87.4	181.1	2.5	160.08	72.68	28.92	2.5	98.175	49.09	0.74	1.48	71.53	43.05
27	1	78	87.3	208.7	1.85	182.05	94.75	28.13	3.15	98.175	61.85	0.97	1.53	62.88	41.08
	2	43	86.6	195.7	2.12	171.08	84.48	29.14	2.88	98.175	56.55	0.86	1.49	66.90	42.54
	3	140	86.8	198.5	2.01	173.08	86.28	29.46	2.99	98.175	58.71	0.88	1.47	66.20	43.48

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro2.4. Análisis de datos de la prueba de suelo "centro del Bajío a (800kPa)

Centro del Bajío de la "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
17	1	144	84.6	179.2	2.31	160.05	75.45	25.38	2.69	98.175	52.82	0.77	1.43	70.44	45.06
	2	125	87.7	176.8	2.02	163.03	75.33	18.28	2.98	98.175	58.51	0.77	1.29	70.49	50.48
	3	135	84.8	173.1	2.31	159.09	74.29	18.86	2.69	98.175	52.82	0.76	1.41	70.90	45.90
19	1	126	83	170	2.63	155.04	72.04	20.77	2.37	98.175	46.53	0.73	1.55	71.78	40.46
	2	134	83.7	168.9	2.68	154.04	70.34	21.13	2.32	98.175	45.55	0.72	1.54	72.44	40.61
	3	76	84	178.7	2.4	162.09	78.09	21.27	2.6	98.175	51.05	0.80	1.53	69.41	41.17
21	1	67	84.5	172.5	2.78	156.04	71.54	23.01	2.22	98.175	43.59	0.73	1.64	71.97	36.88
	2	130	85.1	174.3	2.75	158.01	72.91	22.34	2.25	98.175	44.18	0.74	1.65	71.44	36.53
	3	317	85.1	172.9	2.78	157	71.9	22.11	2.22	98.175	43.59	0.73	1.65	71.83	36.56
23	1	64	86.2	170.8	2.81	155.04	68.84	22.89	2.19	98.175	43.00	0.70	1.60	73.03	38.43
	2	298	87.5	171.9	2.85	156.03	68.53	23.16	2.15	98.175	42.22	0.70	1.62	73.15	37.56
	3	49	86.8	175.1	2.8	158.09	71.29	23.86	2.2	98.175	43.20	0.73	1.65	72.07	36.53
25	1	313	84.8	162.8	3.03	147.06	62.26	25.28	1.97	98.175	38.68	0.63	1.61	75.61	38.09
	2	154	84.9	168.8	2.88	152.7	67.8	23.75	2.12	98.175	41.63	0.69	1.63	73.44	37.35
	3	137	87.7	171.5	2.89	155.04	67.34	24.44	2.11	98.175	41.43	0.69	1.63	73.62	37.48
27	1	1	78.1	188.3	2.17	164.01	85.91	28.27	2.83	98.175	55.57	0.88	1.55	66.34	40.54
	2	68	84.9	200.9	2.11	176.05	91.15	27.26	2.89	98.175	56.75	0.93	1.61	64.29	38.22
	3	128	88.1	206.2	1.9	181.02	92.92	27.10	3.1	98.175	60.87	0.95	1.53	63.60	41.29

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro2.5. Análisis de datos de la prueba de suelo "centro del Bajío a (1000Kpa)

Centro del Bajío de la "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
17	1	52	84.2	173.7	2.4	160	75.8	18.07	2.6	98.175	51.05	0.77	1.48	70.30	42.89
	2	132	84.9	172.8	2.45	160.2	75.3	16.73	2.55	98.175	50.07	0.77	1.50	70.50	42.16
	3	44	84.1	175.3	2.35	161.6	77.5	17.68	2.65	98.175	52.03	0.79	1.49	69.64	42.71
19	1	143	84.5	177.6	2.54	161.9	77.4	20.28	2.46	98.175	48.30	0.79	1.60	69.68	38.37
	2	133	84	178	2.56	161.8	77.8	20.82	2.44	98.175	47.91	0.79	1.62	69.52	37.54
	3	314	84.3	178.6	2.51	162.7	78.4	20.28	2.49	98.175	48.89	0.80	1.60	69.29	38.32
21	1	123	84.8	172.3	2.75	156.3	71.5	22.38	2.25	98.175	44.18	0.73	1.62	71.99	37.75
	2	282	84.2	169.4	2.87	153.3	69.1	23.30	2.13	98.175	41.82	0.70	1.65	72.93	36.45
	3	151	80.1	169.9	2.76	153.2	73.1	22.85	2.24	98.175	43.98	0.74	1.66	71.36	36.08
23	1	138	84.5	170.6	2.86	153.6	69.1	24.60	2.14	98.175	42.02	0.70	1.64	72.93	36.75
	2	77	83.9	168.7	2.84	151.4	67.5	25.63	2.16	98.175	42.41	0.69	1.59	73.56	38.79
	3	290	81.1	169	2.84	151.4	70.3	25.04	2.16	98.175	42.41	0.72	1.66	72.46	36.25
25	1	58	84.6	171.8	2.86	154.5	69.9	24.75	2.14	98.175	42.02	0.71	1.66	72.62	36.02
	2	75	83.7	170.1	2.81	152.8	69.1	25.04	2.19	98.175	43.00	0.70	1.61	72.93	38.19
	3	145	84.7	179	2.51	160.3	75.6	24.74	2.49	98.175	48.89	0.77	1.55	70.38	40.53
27	1	59	84.6	185.1	2.45	163.4	78.8	27.54	2.55	98.175	50.07	0.80	1.57	69.13	39.47
	2	159	80.1	193.2	2.03	167.9	87.8	28.82	2.97	98.175	58.32	0.89	1.51	65.60	42.09
	3	55	83	204	1.88	177.1	94.1	28.59	3.12	98.175	61.26	0.96	1.54	63.13	40.92

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

A.3.

Cuadro3.1. Análisis de datos de la prueba de suelo "Rastro Municipal" (200Kpa)

Rastro Municipal "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
34	1	52	84.1	158.7	1.5	136.3	52.2	42.91	3.5	98.175	60.48	0.53	0.86	79.55	66.80
	2	305	83.7	158.9	1.8	136.3	52.6	42.97	3.2	98.175	55.29	0.54	0.95	79.39	63.41
	3	311	84.1	157.7	1.6	132.8	48.7	51.13	3.4	98.175	58.75	0.50	0.83	80.92	68.12
36	1	144	87.7	161.9	1.41	146.2	58.5	26.84	3.59	98.175	62.03	0.60	0.94	77.08	63.73
	2	158	79.8	155.3	1.53	132.2	52.4	44.08	3.47	98.175	59.96	0.53	0.87	79.47	66.39
	3	160	84	157	1.41	136.3	52.3	39.58	3.59	98.175	62.03	0.53	0.84	79.51	67.57
38	1	299	85	160.6	1.7	134.5	49.5	52.73	3.3	98.175	57.02	0.50	0.87	80.61	66.61
	2	77	84	167.1	1.8	142.3	58.3	42.54	3.2	98.175	55.29	0.59	1.05	77.16	59.45
	3	62	86.1	161.2	1.54	137.6	51.5	45.83	3.46	98.175	59.78	0.52	0.86	79.82	66.87
40	1	51	85.8	163.2	2.07	138.8	53	46.04	2.93	98.175	50.63	0.54	1.05	79.24	59.74
	2	66	85	165.2	1.22	141.5	56.5	41.95	3.78	98.175	65.31	0.58	0.87	77.87	66.73
	3	125	87.8	166.4	1.28	142.2	54.4	44.49	3.72	98.175	64.28	0.55	0.85	78.69	67.45
42	1	74	81	168.1	2.15	137.3	56.3	54.71	2.85	98.175	49.24	0.57	1.14	77.94	56.03
	2	314	84.3	171.7	1.96	140.6	56.3	55.24	3.04	98.175	52.53	0.57	1.07	77.94	58.78
	3	156	84.1	179.3	1.92	145.4	61.3	55.30	3.08	98.175	53.22	0.62	1.15	75.98	55.70
44	1	122	85.2	175.7	1.5	143.4	58.2	55.50	3.5	98.175	60.48	0.59	0.96	77.20	62.99
	2	143	84.5	190.8	1.67	155	70.5	50.78	3.33	98.175	57.54	0.72	1.23	72.38	52.87
	3	145	84.6	188.6	1.75	151.4	66.8	55.69	3.25	98.175	56.16	0.68	1.19	73.83	54.25

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro3.2. Análisis de datos de la prueba de suelo "Rastro Municipal" (400Kpa)

Rastro Municipal "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
34	1	132	85	161.5	2.35	138.5	53.5	42.99	2.65	98.175	52.03	0.54	1.03	79.04	60.45
	2	312	84	162.3	2.41	136.7	52.7	48.58	2.59	98.175	50.85	0.54	1.04	79.35	60.14
	3	317	85.1	159.5	2.35	137.5	52.4	41.98	2.65	98.175	52.03	0.53	1.01	79.47	61.27
36	1	1	78	158.3	2.51	134.2	56.2	42.88	2.49	98.175	48.89	0.57	1.15	77.98	55.79
	2	152	85	172.2	2.33	144.5	59.5	46.55	2.67	98.175	52.43	0.61	1.13	76.69	56.35
	3	294	86.3	170.1	2.39	141.4	55.1	52.09	2.61	98.175	51.25	0.56	1.08	78.41	58.65
38	1	308	85.1	159.1	2.76	133.4	48.3	53.21	2.24	98.175	43.98	0.49	1.10	81.08	57.76
	2	44	84.2	160.9	2.66	137.5	53.3	43.90	2.34	98.175	45.95	0.54	1.16	79.12	55.38
	3	133	84.1	162.9	2.58	137.1	53	48.68	2.42	98.175	47.52	0.54	1.12	79.24	57.10
40	1	307	84.1	165.2	2.54	139.5	55.4	46.39	2.46	98.175	48.30	0.56	1.15	78.30	55.89
	2	72	87.5	167.2	2.56	142.5	55	44.91	2.44	98.175	47.91	0.56	1.15	78.45	55.85
	3	148	88	169.2	2.52	141.1	53.1	52.92	2.48	98.175	48.69	0.54	1.09	79.20	58.06
42	1	123	84.8	175.5	2.26	142.9	58.1	56.11	2.74	98.175	53.80	0.59	1.08	77.24	58.46
	2	309	87.4	188.9	1.9	156.2	68.8	47.53	3.1	98.175	60.87	0.70	1.13	73.05	56.53
	3	306	85.5	189.9	1.81	152.9	67.4	54.90	3.19	98.175	62.64	0.69	1.08	73.60	58.61
44	1	140	86.7	183.2	2.05	151.1	64.4	49.84	2.95	98.175	57.92	0.66	1.11	74.77	57.24
	2	126	83	180.4	2.08	147.6	64.6	50.77	2.92	98.175	57.33	0.66	1.13	74.69	56.66
	3	159	80	173.7	2.15	143.6	63.6	47.33	2.85	98.175	55.96	0.65	1.14	75.08	56.29

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro3.3. Análisis de datos de la prueba de suelo "Rastro Municipal" (600Kpa)

Rastro Municipal "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	Peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
34	1	61	85.3	166.8	2.3	142.4	57.1	42.73	2.7	98.175	53.01	0.58	1.08	77.63	58.57
	2	59	84.6	163.3	2.41	142.2	57.6	36.63	2.59	98.175	50.85	0.59	1.13	77.43	56.44
	3	154	84.8	160.3	2.42	136.8	52	45.19	2.58	98.175	50.66	0.53	1.03	79.63	60.52
36	1	157	84.4	158.2	2.81	135.8	51.4	43.58	2.19	98.175	43.00	0.52	1.20	79.86	54.03
	2	128	88.2	163.7	2.72	142	53.8	40.33	2.28	98.175	44.77	0.55	1.20	78.92	53.78
	3	315	76.4	157.5	2.5	132	55.6	45.86	2.5	98.175	49.09	0.57	1.13	78.22	56.44
38	1	296	87.4	163.9	2.65	141.2	53.8	42.19	2.35	98.175	46.14	0.55	1.17	78.92	55.16
	2	65	85	160.2	2.6	137.9	52.9	42.16	2.4	98.175	47.12	0.54	1.12	79.28	56.82
	3	300	85.4	164.7	2.67	141.1	55.7	42.37	2.33	98.175	45.75	0.57	1.22	78.18	53.17
40	1	318	84.9	167.7	2.55	142.2	57.3	44.50	2.45	98.175	48.11	0.58	1.19	77.55	54.19
	2	286	84.8	172.2	2.33	145	60.2	45.18	2.67	98.175	52.43	0.61	1.15	76.42	55.83
	3	303	85.6	170.4	2.5	144	58.4	45.21	2.5	98.175	49.09	0.59	1.19	77.12	54.24
42	1	288	84.5	190.2	1.8	156.8	72.3	46.20	3.2	98.175	62.83	0.74	1.15	71.68	55.74
	2	63	79.9	156.9	2.33	132.5	52.6	46.39	2.67	98.175	52.43	0.54	1.00	79.39	61.41
	3	304	85.4	163.4	2.24	138.4	53	47.17	2.76	98.175	54.19	0.54	0.98	79.24	62.38
44	1	130	85.1	191.3	1.82	156.8	71.7	48.12	3.18	98.175	62.44	0.73	1.15	71.91	55.83
	2	121	84.7	174.1	2.23	145.4	60.7	47.28	2.77	98.175	54.39	0.62	1.12	76.22	57.08
	3	124	84.6	176.5	2.12	146.5	61.9	48.47	2.88	98.175	56.55	0.63	1.09	75.75	57.90

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro3.4. Analisis de datos de la prueba de suelo "Rastro Municipal" (800Kpa)

Rastro Municipal "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
34	1	319	86.2	162.7	2.72	141.6	55.4	38.09	2.28	98.175	44.77	0.56	1.24	78.30	52.40
	2	320	82.9	158.1	2.72	137.3	54.4	38.24	2.28	98.175	44.77	0.55	1.22	78.69	53.26
	3	142	88.1	162.3	2.72	142.1	54	37.41	2.28	98.175	44.77	0.55	1.21	78.84	53.61
36	1	139	85.5	162.1	2.78	139.6	54.1	41.59	2.22	98.175	43.59	0.55	1.24	78.81	52.26
	2	153	84.6	163.7	2.74	140.9	56.3	40.50	2.26	98.175	44.38	0.57	1.27	77.94	51.20
	3	136	83.9	163.4	2.67	140.6	56.7	40.21	2.33	98.175	45.75	0.58	1.24	77.79	52.33
38	1	141	85.4	168.7	2.54	144	58.6	42.15	2.46	98.175	48.30	0.60	1.21	77.04	53.34
	2	149	85.5	171	2.45	145.5	60	42.50	2.55	98.175	50.07	0.61	1.20	76.49	53.91
	3	283	87.6	176.7	2.39	150.2	62.6	42.33	2.61	98.175	51.25	0.64	1.22	75.48	53.02
40	1	47	85.4	175.9	2.28	147.4	62	45.97	2.72	98.175	53.41	0.63	1.16	75.71	55.35
	2	46	87.7	178.4	2.24	149.9	62.2	45.82	2.76	98.175	54.19	0.63	1.15	75.63	55.86
	3	284	84.6	180.6	2.3	150.1	65.5	46.56	2.7	98.175	53.01	0.67	1.24	74.34	52.48
42	1	287	84.2	171.5	2.38	143.3	59.1	47.72	2.62	98.175	51.44	0.60	1.15	76.85	55.81
	2	42	84.1	168.2	2.48	141	56.9	47.80	2.52	98.175	49.48	0.58	1.15	77.71	55.77
	3	48	84.1	173.3	2.42	144.8	60.7	46.95	2.58	98.175	50.66	0.62	1.20	76.22	53.91
44	1	78	87.03	175.6	2.07	146	58.97	50.20	2.93	98.175	57.53	0.60	1.03	76.90	60.58
	2	53	86.5	177.3	2.04	147.1	60.6	49.83	2.96	98.175	58.12	0.62	1.04	76.26	59.90
	3	60	84.6	183.6	1.96	150.7	66.1	49.77	3.04	98.175	59.69	0.67	1.11	74.10	57.41

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.

Cuadro3.5. Análisis de datos de la prueba de suelo "Rastro Municipal" (1000kPa)

Rastro Municipal "UAAAN"

% de Humedad	Repetición	Numero del cilindro	peso del cilindro gr	PSH mas cilindro gr	Reducción de altura cm	pss mas cilindro gr	PSS gr	Humedad %	Altura final del suelo cm	Volumen inicial cm ³	Volumen final cm ³	Densidad inicial g/cm ³	Densidad final g/cm ³	Porosidad inicial %	Porosidad final %
34	1	285	87.4	160.6	2.55	140.6	53.2	37.59	2.45	98.175	48.1058	0.54	1.11	79.16	57.47
	2	41	86.5	160	2.5	139.6	53.1	38.42	2.5	98.175	49.0875	0.54	1.08	79.20	58.39
	3	45	83.8	158.8	2.6	137.9	54.1	38.63	2.4	98.175	47.124	0.55	1.15	78.81	55.84
36	1	289	87.8	168.2	2.66	144.5	56.7	41.80	2.34	98.175	45.9459	0.58	1.23	77.79	52.54
	2	291	85.8	167.1	2.62	143.4	57.6	41.15	2.38	98.175	46.7313	0.59	1.23	77.43	52.59
	3	293	87.4	166.5	2.55	143.2	55.8	41.76	2.45	98.175	48.1058	0.57	1.16	78.14	55.39
38	1	70	83.7	171.6	2.39	145.6	61.9	42.00	2.61	98.175	51.2474	0.63	1.21	75.75	53.54
	2	73	79.5	165.7	2.51	140	60.5	42.48	2.49	98.175	48.8912	0.62	1.24	76.30	52.41
	3	129	86.5	171.2	2.53	145.9	59.4	42.59	2.47	98.175	48.4985	0.61	1.22	76.73	52.89
40	1	292	85	180	2.08	149.6	64.6	47.06	2.92	98.175	57.3342	0.66	1.13	74.69	56.66
	2	50	85.1	185.4	1.95	153.2	68.1	47.28	3.05	98.175	59.8868	0.69	1.14	73.32	56.26
	3	146	87.6	189.2	1.86	156.1	68.5	48.32	3.14	98.175	61.6539	0.70	1.11	73.16	57.27
42	1	127	81	162.4	2.35	135.6	54.6	49.08	2.65	98.175	52.0328	0.56	1.05	78.61	59.64
	2	57	84.7	173	2.29	144.3	59.6	48.15	2.71	98.175	53.2109	0.61	1.12	76.65	56.92
	3	71	88.2	178.5	2.29	149.6	61.4	47.07	2.71	98.175	53.2109	0.63	1.15	75.95	55.62
44	1	54	86.8	173.7	2.31	145	58.2	49.31	2.69	98.175	52.8182	0.59	1.10	77.20	57.62
	2	80	84.6	171.4	2.32	141.6	57	52.28	2.68	98.175	52.6218	0.58	1.08	77.67	58.34
	3	155	85.4	172.9	2.34	144	58.6	49.32	2.66	98.175	52.2291	0.60	1.12	77.04	56.85

PSH; Peso del suelo húmedo, PSS; Peso del suelo seco.