



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA “ANTONIO NARRO”

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Evaluación de un sistema para determinar la
humedad en el suelo basado en la técnica de
dominio de frecuencia (FD)

Por:

MIGUEL ANGEL MÁRQUEZ CASTILLO

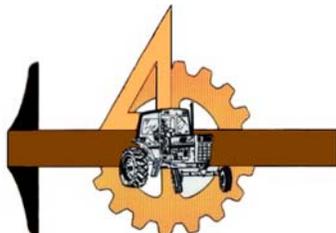
T E S I S

Presentada como Requisito Parcial para
Obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.

Agosto de 2004



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

Evaluación de un sistema para determinar la humedad en el suelo basado en la técnica de dominio de frecuencia (FD)

Por:

Miguel Ángel Márquez Castillo

T E S I S

Que somete a la Consideración del H. Jurado Examinador como Requisito
Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO MECÁNICO AGRÍCOLA

Aprobada por el Comité de Tesis
Asesor Principal

Dr. Martín Cadena Zapata

Sinodal

Sinodal

M.C. Tomás Gaytán Muñiz

M.C. Héctor Uriel Serna Fernández

Coordinador de la División de Ingeniería

M.C. Luis E. Ramírez Ramos

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Agosto de 2004

Agradecimientos

Primeramente a **Dios** nuestro señor padre, por haberme dado la vida y por ofrecerme cada día una razón para amarla Gracias y a ti **Virgen de Guadalupe** por no dejarme solo, ya que en la vida nos encontramos en momentos muy difíciles en donde a veces pensamos que para nosotros es muy duro salir adelante, y que con nuestra fe puesta en él se pueden hacer las cosas. Gracias dios mío.

A mi **ALMA TERRA MATER**, que me acogió en su seno, y me preparo para ser un hombre capaz para poder enfrentar los retos de la vida.

Al **Dr. Martín Cadena Zapata** por compartir conmigo sus conocimientos, por sus oportunos consejos, paciencia, por su confianza y estímulo, pero sobre todo por su amistad. Sinceramente gracias.

Al **M.C. Tomás Gaytán Muñoz** por brindarme la asesoría necesaria para la terminación de este proyecto.

Al **M.C. Héctor Uriel Serna Fernández** por facilitarme el apoyo requerido para la culminación de esta tesis, y sobre todo su amistad y confianza. Siempre le estaré agradecido. Muchas gracias ingeniero.

A mis compañeros de la **generación XCVI**, de la carrera de **Ingeniero Mecánico Agrícola** y en especial:

A Nadia Escamilla, Guadalupe Segundo, Ángel Mendoza, Octavio Cárdenas, Eddy Balán, Miguel Ángel Chán, Juan José Vásquez, Orlando Suárez, Kennedy Mendoza, Víctor Hugo Zetina, Iván de Jesús Méndez, José Manuel Gallegos, Roberto Rivelino, Rigoberto Vásquez, Carlos A. Ramírez, Juan Carlos Gómez, Héctor R. Anacleto, Inés Antonio Muñoz, Francisco Rodríguez, Roberto Martínez, Humberto Estrada, José Luis Acevedo, Héctor Espejel.

Por haberme dado la oportunidad de compartir su amistad, alegrías, tristezas, desvelos, fiestas y risas que pasamos juntos. Muchas gracias amigos.

A todos los ingenieros del Departamento de Maquinaria Agrícola en especial al **Ing. Juan Arredondo Valdez, M.C. Juan Antonio Guerrero Hernández, Dr. Aguinaldo García Santos, Ing. B. Sergio Martínez Medellín, Ing. Rosendo González Garza, Ing. Jorge Flores Berrueto, Ing. Ramiro Luna Montoya, M.C. Jesús Valenzuela García, Ing. Blanca Elizabeth de la Peña Casas.**

Por haberme brindado su amistad y sobre todo por inculcarme el deseo de superación y permitirme aprender de ellos.

Al personal del Taller de Maquinaria: **Mario Amaro, Yonhy**. A la secretaria **Juanita** y la Sra. **Lidia**. Por brindarme el apoyo necesario para la realización de la tesis, GRACIAS.

A mis amigos: **Guillermo Martínez Morales, V. Blas Pérez Luna, Heberto González Paulino, Juan de Dios Reynoso Tristán, Héctor Lara Hernández, Francisco Martín Hernández, Guillermo Balderas Rosales, Rene Félix, Francisco Martill**. Por haber compartido su amistad, fiestas, malos ratos, a ustedes les deseo lo mejor de la vida.

A mis amigas: **Cecilia Martínez, Edith de la Cruz, Fabi**, por motivarme para salir adelante, consejos y sobre todo su amistad y cariño que nos une. Donde quiere se encuentren que dios las bendiga.

A la **Familia Delgado Pérez**, por abrirme las puertas de su casa, por el apoyo brindado, para salir adelante y sobre todo su amistad. **Sra. Doña Licha**. Gracias. Siempre los recordare.

A la **Familia Limón Balderas**, por brindarme el apoyo necesario y sobre todo su amistad y confianza. **Sra. Doña Linda**, "MUCHAS GRACIAS". Que dios ilumine su humilde trabajo.

Al **Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología (COECYT)**. Por otorgarme una beca para la terminación de este proyecto de investigación.

Al **Sr. Martín Castañeda (†)** por ser una persona de buen corazón, por todos sus consejos, motivación, paciencia, ayuda y sobre todo su amistad y cariño. Que dios ilumine su camino. MUCHAS GRACIAS.

Y sobre todo con todo mi amor y admiración, a quienes debo y agradezco cada uno de mis logros por su grandioso apoyo y amor incondicional. A la **Fam. Márquez Castillo**.

¡Gracias a todos los demás, particularmente a quienes haya olvidado aquí, que me ayudaron con este proyecto!

A mis padres:

Con todo mi amor y admiración, a quienes debo y agradezco cada uno de mis logros por su grandioso apoyo y amor incondicional.

Sra. María Castillo Mancilla

Gracias a ti madre por darme la vida, por tus consejos, desvelos, sufrimientos y preocupaciones, te dedico este trabajo con mucho amor y cariño. "Gracias Mamá"

Sr. Miguel Márquez Antonio

Te agradezco padre por brindarme el apoyo, con tu humilde trabajo, el esfuerzo que has hecho para salir adelante, por tus consejos, preocupaciones. Te dedico esta tesis. "Gracias Papá"

A mis **hermanos:**

Guillermina, Maricela, Columba, Leticia, Yulissa, José Manuel

Con quienes he compartido toda una vida, por su ayuda, motivación, en reconocimiento a la tolerancia y la paciencia que me brindaron durante el período escolar y durante el tiempo que escribí la tesis.

“De todo corazón donde quiera que se encuentren que Dios los bendiga “

A mis cuñados **Sergio y Santiago**, por la amistad y el apoyo brindado y sobre todo los lazos que nos unen. Que dios ilumine su camino y su humilde trabajo.

A mi futuro sobrina (o) y **Carmen**, por darme la dicha de escuchar decirme tío. Que dios los cuide y los proteja.

A mis **Abuelitos**

Por sus consejos y ser un hombre de principios, de fe y esperanza. Por todo esto y mucho más. “MUCHAS GRACIAS”.

INDICE DE CONTENIDO

	Página
Agradecimientos	i
Dedicatoria	iii
Índice de cuadros.....	vi
Índice de figuras	vii
RESUMEN.....	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Importancia de conocer el contenido de humedad en el perfil del suelo.	1
1.2 Necesidad de métodos para conocer la humedad en tiempo real.....	2
1.3 Objetivo e Hipótesis	3
II. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Métodos para medir la humedad en el perfil del suelo.	4
2.1.1 Métodos directos	5
2.1.2 Métodos indirectos.....	4
2.2 Experiencias con el FD.....	18
2.3 Importancia de conocer el estado de humedad del suelo en relación a la realización de labores.	19
2.4 Problemas de compactación.	20
2.5 Problemas de mala calidad de labores de labranza.	20
III. MATERIALES Y MÉTODOS	22
3.1 Selección de los tipos de textura de suelo para el experimento.....	22

3.2 Procedimiento para el seguimiento del contenido de humedad y permitividad relativa en los sitios experimentales.....	22
3.2.1 Preparación y seguimiento del estado de humedad en los sitios experimentales.	23
3.2.2 Determinación del contenido de humedad y toma de lecturas de permitividad relativa.....	23
3.2.3 Densidad aparente.....	24
3.2.4 Proceso de compactación.....	26
	v
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	28
4.1 Ubicación geográfica.....	28
4.2 Descripción de los suelos utilizados en el experimento.	28
4.3 Resultados del seguimiento del contenido de humedad y permitividad relativa del suelo.	29
4.3.1 Comportamiento de la humedad del suelo de textura franca franca arenosa.....	29
4.3.2 Comportamiento de las lecturas de permitividad relativa del suelo de textura franca arenosa.....	30
4.3.3 Comportamiento de la relación de datos de humedad y permitividad del suelo del suelo de textura franca arenosa	31
4.3.4 Comportamiento de la densidad aparente del suelo al simular la compactación a diferentes contenidos de humedad del suelo de textura franca arenosa.....	32
4.3.5 Comportamiento de la humedad en el suelo de textura franca arcillosa	33
4.3.6 Comportamiento de las lecturas de permitividad relativa del suelo de textura franca arcillosa.....	35

4.3.7 Comportamiento de los resultados obtenidos de contenido de humedad y permitividad relativa de la textura franca arcillosa.....	36
4.3.8 Resultados obtenidos de densidad aparente al simular la compactación a diferentes contenidos de humedad del suelo de textura franca arcillosa.....	37
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	38
5.1 Conclusiones.....	38
5.2 Recomendaciones.....	39
VI. LITERATURA CITADA	40
VII. ANEXOS	42
A-1 Datos obtenidos de humedad, permitividad relativa y densidad aparente de la textura franca arenosa del sitio experimental. "UAAAN" Estación "Centro El Bajío"	43
B-1 Datos obtenidos de humedad, permitividad relativa y densidad aparente de la textura franca arcillosa del sitio experimental. "Estación San Juan"	57

INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 2.1 Guía para la interpretación de la humedad del suelo.....	5

Cuadro 3.2 Texturas de los suelos de las áreas agrícolas representativas en el campo experimental	28
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----------

INDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1 Sitio de toma da datos	23
Figura 3.2 Obtención de muestras de suelos y lecturas de permitividad del suelo	24
Figura 3.3 Barrena de extractor de núcleos	25
Figura 3.4 Prensa neumática (simulador de compactación).....	26

Figura 4.1 Valores promedio de humedad en el perfil del suelo franco arenoso para la primera medición.....	29
Figura 4.2 Comportamiento de los valores obtenidos promedio de humedad obtenidos en una segunda medición	30
Figura 4.3 Permitividad relativa para la primera medición.....	31
Figura 4.4 Comportamiento de la permitividad relativa para la segunda medición	31
Figura 4.5 Relación entre los valores de humedad y permitividad relativa en un suelo franco arenoso	32
Figura 4.6 Valores promedio de densidad aparente en un suelo franco arenoso (antes y después de la compactación).....	33
Figura 4.7 Comportamiento de la humedad en un suelo franco arcilloso para la primera medición.....	34
Figura 4.8 Comportamiento de la humedad de un suelo franco arcilloso	34
Figura 4.9 Comportamiento de permitividad relativa para la primera medición	35
Figura 4.10 Comportamiento de la permitividad relativa para la segunda medición	35
Figura 4.11 Relación entre los valores de humedad y permitividad relativa en el suelo franco arcilloso.....	36
Figura 4.12 Tendencia de densidad aparente en el perfil del suelo franco arcilloso (antes y después de la compactación).....	37

En relación del manejo de maquinaria agrícola no se tiene actualmente en el país una forma de determinar rápidamente los valores de humedad y realizar decisiones rápidas.

Las formas actuales de medición de humedad en el suelo resultan bastante tardadas (hasta 24 horas para obtener los resultados) cuando en la operación de maquinaria se requiere obtener la información inmediatamente, puesto que se debe decidir si se realizara o no labor en el momento.

Las técnicas que se usan en algunos países para mediciones de humedad en sitio, como reflectometría (TDR) donde se obtienen los datos al instante, resultan ser para los agricultores en México demasiadas costosas y difíciles de implementar.

Es por eso que surge la necesidad de evaluar otros sistemas de medición de contenido de humedad. En este contexto se ubica la evaluación de método de dominio de frecuencia (FD) teniendo como referencia el método gravimétrico.

A partir de sitios con suelos representativos bajo agricultura, se delimitaron con bordos de 30 cm de altura, áreas de 5x2 m para ser irrigado por medio de inundación, para que a partir de un estado de suelo saturado dar seguimiento al contenido de humedad en el tiempo durante un proceso normal de secado de campo.

El seguimiento de humedad se realizó mediante tomas de muestras de suelo en cilindros de volumen conocido para determinar el contenido de

humedad por el método gravimétrico y relacionarlo, tomando al mismo tiempo lecturas de permitividad relativa con el sistema de dominio de frecuencia (FD).

De las pruebas realizadas se obtuvieron resultados favorables, ya que en las pruebas de campo la relación entre el contenido de humedad y los valores de permitividad del suelo tiene un coeficiente de correlación $r = 0.84$, para un suelo de textura franco arenosa y para un suelo de textura franca arcillosa fue de $r = 0.78$.

Por lo que se llegó a la conclusión que el sistema para determinar la humedad del en el suelo si es confiable y proporciona información cuantitativa a nivel operacional y que el uso de la técnica de FD se puede realizar determinaciones del estado de humeada más rápido, menos costosas y tomar decisiones en el momento adecuado para realizar labores de labranza.

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Importancia de conocer el contenido de humedad en el perfil del suelo.

La humedad del suelo depende en gran medida de las condiciones climáticas, de la cobertura vegetal y de las propiedades físicas del suelo, las cuales determinan la capacidad de almacenamiento de agua. El suelo además de ser un medio de soporte de las plantas, constituye uno de los factores que afecta de manera importante al desarrollo y producción de muchos cultivos. Esto se debe fundamentalmente al arreglo, tamaño y distribución espacial de partículas y agregados, los cuales definen en gran parte a la proporción de macro y microporos responsables de la aireación, infiltración de agua, retención de humedad y flujo de calor en el suelo (Malagón, 1976).

El agua se infiltra en el suelo a través de los macroporos, para ser retenida en parte en los microporos y el resto percola a través del perfil hacia estratos más profundos o hasta el nivel freático. Por otra parte, el agua se disuelve y transporta nutrientes, sales solubles, contaminantes y hace posible la absorción por las raíces, influyendo en la producción vegetal.

El agua en el suelo no esta libremente disponible como un contenedor, sino que está retenida con energía variable que debe ser

superada por las plantas para poder ser incorporada y permitir la producción de materia seca. La cantidad de agua retenida es característica de cada suelo y en relación con sus propiedades físicas.

El conocimiento del contenido de agua en el suelo o humedad edáfica es fundamental para explicar una serie de procesos de índole diversa: balances de agua, tasas de infiltración, generación de escorrentía, riesgos hidrológicos, crecimiento y desarrollo de cultivos, estabilidad de formaciones forestales, modelización hidrológica, etc., el contenido de agua en el suelo depende de los resultados de la acción o fuerzas aplicadas por implementos al suelo y esto explica la calidad de las labores y la energía que se utilizó para realizarlas.

El efecto de una herramienta de labranza en un suelo dado depende grandemente del contenido de humedad a los cuales la operación es llevada a cabo (Spoor, 1975). Por eso es muy importante, medir, calcular y predecir el estado de humedad en el suelo, junto con los valores mínimos que delimitan el contenido de agua en el suelo óptimo en el cual un implemento dado alcanza un resultado de labranza deseado.

1.2 Necesidad de métodos para conocer la humedad en tiempo real.

La humedad del suelo es un parámetro básico en la agronomía de manera que su determinación debería ser uno de los indicadores en la evaluación de la necesidad de aplicar agua para riego. Existen diversas metodologías para la determinación de la humedad. Entre ellas, las más clásicas gravimétricas, lisímetro de pesada o de drenaje, atenuación de rayos gamma, sonda de neutrones; la primera de ellas es operacionalmente sencilla pero es destructiva, de manera que no es posible determinar la variación de la humedad en un mismo punto (Fabregat, 1999).

Desde hace dos décadas, la técnica TDR (Time Domain Reflectometry) ha sido la que más difusión ha alcanzado para medir la humedad edáfica hasta superar los métodos considerados tradicionales (gravimetría, sonda de neutrones, resistencia eléctrica, etc).

En la técnica TDR confluyen diversas aplicaciones industriales en el campo de la electrónica, ideadas en su momento para detectar anomalías en las líneas de transmisión eléctrica, y la respuesta del campo eléctrico de los constituyentes del suelo. En las dos últimas décadas, muchos investigadores han utilizado esta metodología para medir el volumen de agua edáfica a partir de la influencia de la humedad sobre las propiedades eléctricas del suelo (Toop et al., 1980).

El conocimiento del desempeño de un sistema de Dominio de Frecuencia (FD) para conocer la humedad en el perfil del suelo en tiempo real resulta de mucho beneficio como información para los usuarios de maquinaria agrícola puesto que se podrá conocer en el momento si existen condiciones adecuadas o no para efectuar las labores, de esta manera se evitarían gastos de energía y deterioro del suelo por compactación lo que reanudaría en mayor eficiencia en los sistemas de producción agrícola, incluidos los del estado de Coahuila y particularmente aquellos altamente mecanizados como en la Región Laguna y Norte del Estado.

1.3 Objetivo e Hipótesis

Objetivo

Evaluar la confiabilidad de un sistema para determinar la humedad en el suelo basado en la técnica de dominio de frecuencia (FD) comprendido con el sistema de medición gravimétrico como referencia.

Hipótesis

La medición (monitoreo) del contenido de humedad del suelo con la técnica de FD proveerá información cuantitativa confiable en el nivel operacional para tomar decisiones en relación a las operaciones de labranza.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Métodos para medir la humedad en el perfil del suelo.

Se han desarrollado diversos métodos para determinar la humedad del suelo, de costos y precisiones diferentes y su uso depende de los objetivos de la determinación.

En la actualidad existen varios métodos que permiten estimar la humedad del suelo en un momento dado, Rojas (1972) y Aguilera (1996) los clasifican en:

Métodos Directos

- a) Al tacto**
- b) Gravimétrico**
- c) Lisimétrico**

Métodos Indirectos

- a) **Tensiómetros**
- b) **Resistencia Eléctrica**
- c) **Aspersor de Neutrones**
- d) **Medidor Rápido de Humedad Speedy**
- e) **Time Domain Reflectometry (TDR)**

2.1 .1 Métodos directos

Método al tacto

Según Miles (1998), señala que al tacto y el aspecto del suelo indican el estado de la humedad. Se puede utilizar un tubo, un taladro o una pala espada para hacer el muestreo de los suelos y poder determinar el contenido de humedad.

El método consiste en muestras de suelo en estratos a lo largo de la profundidad de la zona activa de la raíz. Se realiza una estimación del estado de la humedad del suelo exprimiendo firmemente un puño del mismo y comparando resultados con el cuadro 2.1

Cuadro 2.1 Guía para la interpretación de la humedad del suelo

% DE HUMEDAD APROVECHABLE	TEXTURA DEL SUELO			
	GRUESA	LIGERA	MEDIA	PESADO
0	Seco, suelto, se pasa a través de los dedos.	Seco, suelto, se pasa a través de los dedos.	Polvoroso, seco, algunos casos costras que se quiebran fácilmente.	Duro, agrietado, algunas veces con costras sueltas sobre la superficie.
25 a 50	Apariencia seca, no se forma una bola bajo presión de la mano.	Apariencia seca, so se forma una bola bajo presión de la mano.	Algo costroso, pero forma una bola bajo presión de la mano.	Algo moldeable. Forma una bola bajo presión de la mano.
	Apariencia seca, no forma una	Tiende a formar una bola bajo	Forma una bola bajo presión de	Forma una bola bajo presión,

50 a 75	bola bajo presión de la mano.	presión, pero no estable.	la mano, algunas veces brilla bajo presión	forma tiras de suelo al moldearlo con los dedos.
75 a 100	Con tendencia a agregarse a veces forma una bola muy débil.	Forma una bola de poca estabilidad bajo presión, no presenta brillo.	Forma una bola bajo presión, y es muy moldeable, brilla fácilmente, si tiene mucha arcilla.	Fácilmente forma tiras de suelo al moldearlos con los dedos, es lustroso.
100	Al comprimirlo en la mano aparece agua sobre el suelo pero deja húmeda la mano.			
Más de 100	Al comprimirlo en la mano escurre agua.	Escurre agua al amasarlo.	Puede escurrir agua al comprimirlo.	Lodoso y escurre sobre la superficie.

Utilizando el cuadro 2.1 para determinar la cantidad de agua requerida para rellenar la zona de la raíz basado en el por ciento de deficiencia de la humedad del suelo. Por ejemplo, puede ser estimado que un suelo arcilloso limoso retiene 5.08 cm de humedad disponible por cada 30 cm. de profundidad.

Si la prueba del tacto indica que el 60 por ciento de la humedad esta agotada en el pie superior, requiere 60 por ciento de 5.08 cm, o 3.048 cm., para rellenar los 30 cm superiores.

Agregue las estimaciones para cada 30 cm de la zona de la raíz para determinar la cantidad total de agua necesitada para rellenar la zona de raíz.

Método Gravimétrico

Según Narro (1994), señala que el principio de este método se basa en la determinación de la masa del agua contenida en la masa de sólidos de una muestra de suelo. Este método se considera estándar o de referencia, pues con él se mide directamente al contenido de humedad del suelo, el cual se calcula por medio de la fórmula:

$$P_w = \left[\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right] 100$$

Donde:

P_w = Contenido de humedad (%)

P_{sh} = Peso del suelo húmedo (g)

P_{ss} = Peso del suelo seco (g)

El porcentaje gravimétrico de agua (P_w) indica los gramos de masa de agua (M) que existen en un suelo por cada 100 g de masa de sólidos (Ms). Se determina al pesar una muestra de suelo húmedo (P_{sh}), luego, se seca en la estufa entre 105 y 110 °C, se enfría y su peso de suelo seco (P_{ss}) se sustituye en la fórmula citada.

El procedimiento se inicia con la obtención de muestras de suelo representativas del área y condiciones que se desea evaluar.

Las muestras de porcentaje gravímetro se obtienen, mediante el uso de barrenas u otra herramienta apropiada, del perfil del suelo, a la profundidad programada, debe tenerse cuidado de no exponer al sol o al aire las muestras para no correr el riesgo de que pierdan humedad por evaporación, para evitar esto se depositan en latas y se encierran herméticamente.

El transporte de los botes debe hacerse en cajas de madera apropiadas, de tal manera que estos no estén sueltos; además de protegerlos contra rayos del sol, se recomienda también cubrir las cajas con una lona o costales humedecidos cuando la temperatura ambiente sea muy alta.

Principales ventajas

- Es un método directo para determinar el contenido de humedad del suelo y se utiliza como estándar o método de referencia.
- El equipo requerido se encuentra disponible en muchos lugares o se puede improvisar satisfactoriamente.
- El único costo importante es el de mano de obra.

Principales desventajas

- Los valores de P_w obtenidos para un mismo suelo y profundidad pueden mostrar notoria variación; por lo tanto, es necesario tomar varias muestras por un punto de observación y promediar los valores después de descartar las observaciones que se consideren erróneas.
- El método es lento; normalmente se requieren más de 24 horas para obtener la información.
- Se requiere transportar los materiales (barrena, latas, etc.) al campo y del campo al laboratorio; además, se invierte un elevado número de horas de trabajo.

- En los suelos cultivados, los hoyos que se hacen pueden dañar algunas plantas o tubérculos (papa, zanahoria, etc), además, después de los riegos no se debe muestrear cerca de los hoyos anteriores, los cuales se deben tapar, una vez extraída la muestra.
- Las muestras obtenidas y usadas son muy pequeñas.

2.1.2 Métodos indirectos

Tensiómetros

Honorato (2000), señala que este método consiste en realizar mediciones a fin de conocer el estado energético del agua del suelo. El tensiómetro consiste en un tubo metálico o plástico con un terminal cerámico conectado a un tubo interior lleno de agua y a un manómetro o vacuómetro en el otro extremo. Para realizar las medidas debe esperarse que el tubo recién enterrado y el contacto con el suelo alcance el equilibrio. Si el suelo está seco, va salir agua del tubo a través del terminal cerámico registrándose en el manómetro.

Preparación de los tensiómetros para su instalación

Es necesario preparar los tensiómetros para su instalación, siguiendo los pasos que se indican a continuación (Narro, 1994).

1. Se enrosca la punta cerámica en el tubo del tensiómetro. Se asegura que la junta tórica esta correctamente asentada.
2. Se prepara la solución del tensiómetro siguiendo las instrucciones que se indican en la etiqueta de la botella (una medida, sin rebosar,

del mismo tapón de la botella, del líquido concentrado, en cuatro litros de agua destilada).

3. Se lleva el equipo al campo y se prepara el agujero para la colocación del tensiómetro, pero esto se puede utilizar el martillo-punzón o un tubo de 0.5 pulgadas de diámetro.
4. Quite la tapa con rosca y llene el aparato, incluyendo el depósito, con una solución o agua destilada.
5. Con la tapa quitada, se coloca la ventosa de la bomba de aspiración sobre el depósito y se bombea con fuerza hasta que la aguja del vacuómetro marque una lectura de 80 cb – 85 cb (normalmente bastará con 5 ó 6 golpes rápidos de bomba). De unos golpecitos al vacuómetro, para que salga el aire, girándolo lentamente de lado a lado. Desconecte la bomba con cuidado para evitar daños al vacuómetro. Repita la operación anterior para sacar el aire del vacuómetro; normalmente de 10 a 15 segundos serán suficientes. Vuelva a colocar la tapa roscada, apretando hasta que el tapón de caucho haya tocado el asiento; entonces gire la tapa $\frac{1}{4}$ de vuelta. No apriete excesivamente, por que podría dañar el vacuómetro o el tapón.
6. Quite la cubierta de plástico de la punta cerámica del instrumento, e instale el tensiómetro en el agujero previamente preparado.
7. Se bombea el tensiómetro diariamente y durante 4 ó 5 días, hasta que dejen de aparecer burbujas de aire. Golpeando lateralmente el

instrumento con la tapa, se facilita la salida del aire. Rellene el depósito y vuelva a colocar la tapa. Un instrumento bien desprovisto de aire, aumenta la sensibilidad y ahorra el uso del agua en el mantenimiento de las lecturas.

Principales ventajas

- **Son de lectura rápida y directa.**
- En algunos suelos arenosos las lecturas de los tensiómetros cubren hasta un 80 por ciento del agua aprovechable para las plantas.
- **No se requiere transporte de materiales o equipo, ni se requiere de personal muy especializado.**

Principales desventajas

- **Su rango confiable de trabajo esta entre 0 – 0.08 MPa de tensión, lo cual no es suficiente para muchos suelos.**
- **Cualquier entrada de aire al tensiómetro afecta las lecturas.**
- **Su instalación debe ser muy cuidadosa.**
- **Se deben proteger del paso de la maquinaria agrícola y de otros daños posibles.**
- **El agua liberada por el tensiómetro a través de su capa porosa afecta al esfuerzo de humedad del suelo que lo rodea y las lecturas se minimizan parcialmente.**
- **En muchos casos, el costo de los tensiómetros representa una inversión considerable.**

Bloques de yeso o de resistencia eléctrica

El método de la Resistencia Eléctrica esta basado en el hecho de que la conductividad eléctrica de un sólido poroso, como es el suelo, depende de la cantidad de agua que haya en él (Gavande, 1973).

Consiste principalmente en colocar un par de electrodos dentro de un bloque de material poroso (yeso de Paris, CaSO_4) y calibrar la resistencia al paso de la corriente eléctrica contra el estado energético del agua contenida en el bloque, que al saturarlo y colocarlo en el terreno, a una profundidad determinada, dejará que la humedad dentro de éste se mueva hasta que se equilibre con la del suelo, por lo que al conocer la tensión de la humedad en el bloque, conocemos también la del suelo.

Así, cuando más esta mojado un bloque, más baja es la resistencia medida a través de los dos electrodos.

Antiguamente se utilizaban electrodos metálicos que se introducían en el suelo y después con el puente de resistencia eléctrica se media la resistencia al paso de la corriente que oponía el terreno humedecido. En estas condiciones el método presenta algunos inconvenientes.

- El contacto entre los dos electrodos y el suelo no era total.**
- La resistencia, y desde luego la conductividad, depende de la humedad y además, de la concentración de sales, ocasionando como consecuencia en los suelos salinos se reportaron resultados erróneos.**

Todas estas unidades se deben calibrar de manera que su lectura exprese la resistencia o contenido de humedad. La calibración se puede hacer colocándolos en un suelo puesto en una placa porosa o en una membrana de presión.

Mientras el suelo esta húmedo, los poros en el yeso se llenan de agua que disuelven algo de éste, lo suficiente para hacer una solución saturada de sulfato de calcio, y el agua conduzca corriente eléctrica de una manera independiente de salinidad de agua del suelo, excepto en niveles extremos de salinidad.

El tensiómetro se utiliza cuando las condiciones del suelo son relativamente húmedas, en cambio los bloques de yeso se ocupan en condiciones de sequedad. Algunas veces se utilizan ambos instrumentos puesto que los bloques comienzan a ser sensibles, aproximadamente con el mismo contenido de humedad al que los tensiómetros dejan de funcionar.

Principales ventajas

- La lectura es rápida y de fácil transformación a valores de tensión o de contenido de humedad, cuando se dispone de la curva característica de humedad del suelo en estudio.
- En suelos arcillosos los bloques cubren con buena exactitud más del 80 por ciento de la humedad aprovechable.
- No requiere personal especializado para su manejo.
- El costo de los bloques es relativamente bajo. Permitiendo la adquisición de varias unidades.

- Esta clase de sensor se puede dejar en campo y monitorearse continua y automáticamente si es conectado a un datalogger (comparado con el aspersor de neutrones, por ejemplo, que no se puede).

Principales desventajas

- Tienen poca sensibilidad ante bajas tensiones de humedad del suelo. El rango más bajo de tensión está generalmente en 100 KPa.
- Todos los tipos de bloques sufren de histéresis (más resistencia a mayor humedad o total sequedad).
- La calibración entre unidades comerciales es variable.
- En lugares lluviosos y suelos de alta velocidad de infiltración, los bloques operan correctamente solo durante pocas semanas.

El yeso fue intentado por amortiguar los cambios de salinidad del suelo en el cual se trabaja en cierta medida. El resultado es, sin embargo, que el bloque se degradará en un cierto plazo, y eventualmente se disolverá por completo en la solución del suelo. El tiempo que esto toma puede ser del orden de un año dependiendo sobre todo de las condiciones. Cuanto más extremo sea el contenido de agua más rápido ocurrirá esto.

La sensibilidad en un rango seco es generalmente muy horizontal (un cambio grande de sequedad refleja cambios pequeños en resistencia medida).

Aspersor de neutrones

Sir James Chadwick (1932) mencionado por Gavande (1973) hizo un descubrimiento con el cual más tarde se demostró que la colisión de neutrones con átomos produce dispersión en los primeros y así los neutrones lanzados desde un foco de emisión regresarán al foco luego de chocar con átomos en el medio que los rodea; la cantidad de energía cinética perdida por los neutrones es mayor cuando chocan con átomos de bajo peso molecular.

El aspersor de neutrones ha sido una herramienta valiosa para las investigaciones del agua del suelo ya que fue el primero exitosamente usado para medir el contenido de humedad del suelo en los años 50' s.

El advenimiento de detectores más eficientes dio lugar al uso de fuentes radioactivas más pequeñas y así más seguras. La precisión de las mediciones deben ser siempre altas y satisfactorias para las investigaciones del agua del suelo (error estándar de $< 0.01 \text{ m}^3$, Van Bavel et al; 1956; Gardner, 1986).

Este método se basa en una fuente de neutrones rápidos, constituido por materiales radioactivos y localizada en la sonda del aspersor de neutrones, que al ser emitidos rebotan fuertemente con átomos grandes, sin embargo son dramáticamente debilitados si chocan con átomos de hidrógeno.

En la mayoría de los suelos la única fuente de hidrógeno sería el agua, por lo único retraso en los neutrones rápidos sería debido al agua,

perdiendo algo de su velocidad. Parte de los neutrones rebotados chocan contra un sensor colocado en la misma sonda, son detectados y generan una señal que es ampliada como impulso eléctrico y enviada a un contador en donde registra el número de “golpes” como cuentas por minuto (cpm), que es directamente proporcional al contenido de humedad del suelo.

El Aspersor de Neutrones esta formado por tres partes principales:

- 1. Un aparato de registro y control de operación, en donde se selecciona el tiempo de registro o conteo, se registran las cpm y se vigila la carga eléctrica de operación del aparato.**
- 2. Una sonda unida por un cable al aparato de registro, y que, a su vez, tiene tres partes:**
 - Una fuente de neutrones rápidos, generalmente mezclas de materiales radioactivos.**
 - Un sensor o detector de los impactos de los neutrones , y**
 - Un amplificador de señal.**
- 3. Tubos de acceso al suelo, preferentemente de aluminio, de colocación más o menos permanente, que permite la entrada vertical de la sonda, hasta la profundidad deseada para la obtención de datos. No debe haber espacios libres entre las paredes exteriores del tubo y el suelo.**

Para determinar el contenido de humedad del suelo, en un punto y a cierta profundidad, se coloca la sonda a través del tubo de acceso en un

sitio deseado y se obtiene el valor de las cpm. Este valor se divide entre el de la cpm estándar.

El promedio o cpm estándar sirve para ajustar todas las lecturas obtenidas en el suelo, y su cociente se obtiene por medio de la expresión.

$$R = \frac{Cpm}{Cpm \cdot estándar}$$

Las mediciones del contenido de humedad basándose en este método son puramente empíricas y depende de que se encuentre una buena curva de calibración, que relacione la velocidad de conteo de neutrones lentos con la proporción de agua. Van Bavel et al. (1961) citado por Gavande (1973).

Medidor rápido de humedad speedy

El principio del método rápido (Speedy) se basa en la reacción de la masa de agua contenida en una muestra de suelo, colocada en una cámara especial, con reactivo (carburo de calcio), lo cual produce un gas que genera una presión dentro de la cámara; tal presión es directamente proporcional al contenido de humedad de la muestra.

La cámara especial tiene un manómetro calibrado que nos indica directamente el contenido de agua de la muestra, cuando se usa un peso estándar de suelo en la reacción.

El procedimiento consiste en extraer la muestra de suelo igual que el método gravimétrico; seguidamente se separa una pequeña cantidad de suelo, se pesa en una pequeña balanza que se proporciona con el aparato, y se deposita dentro de la cámara la (botella). En la tapa de ésta se coloca el reactivo y luego se cierra, procurando que suelo y reactivo se mezclen hasta que quede bien cerrada. La cámara se agita hasta lograr una reacción completa entre la masa de agua contenida en la muestra y el reactivo; finalmente se lee el manómetro el cual nos indica el contenido de humedad de la muestra (Narro, 1994).

Time Domain Reflectometry (TDR)

Evolución de la Tecnología TDR

Esencialmente el TDR es un radar a lo largo de un cable coaxial que puede permitir la vigilancia de grandes volúmenes con un solo instrumento. Las distancias a los reflectores a lo largo de cable se calculan por el tiempo, y las características de los reflectores donde quiera a lo largo de un cable se pueden discernir de los detalles de sus señales reflejadas respectivas. La capacidad de interpretar reflexiones de TDR en cualquier lugar a lo largo del cable permite que la actividad sea vigilada en volúmenes grandes o áreas y de esta manera el monitoreo con TDR puede remplazar muchos instrumentos de medición puntuales. Esta ventaja inherente de la vigilancia está propulsando nuevas aplicaciones de TDR en los geomateriales para vigilar derramamientos químicos, los escapes de aceite debajo de tanques de almacenaje, el movimiento de la roca en minas, e incidentes potenciales de la pendiente en suelos suaves (Toop et al; 1980).

En los años 70's, la tecnología de TDR comenzó a ser aplicada con geomateriales, y se extendió su uso y transferencia de tecnología. Ahora la tecnología TDR es empleada por los científicos del suelo, los ingenieros agrícolas, los ingenieros geotécnicos, y los científicos ambientales así como ingenieros eléctricos.

Hoy la tecnología TDR es la “punta de lanza” de aplicaciones diversas incluso en la metodología para la determinación de agua en el suelo y relaciones material/agua. Hasta la fecha, la aplicación dominante del TDR en geomateriales ha sido la medición de humedad (o contenido de agua) de suelos no saturados.

Esta aplicación ocurre con una sonda en el extremo del cable o de la línea de transmisión de dos hilos. De esta manera, se define la localización de la sonda y el tiempo de localización de la sonda y el tiempo de colocación. Las medidas de humedad (contenido de agua) se hacen en el suelo para los terraplenes, los cimientos de los pavimentos de la carretera, pila de almacenamiento de minerales, y otros materiales granulares donde es importante el contenido de agua.

El Amplio rango de la aplicación del TDR.

En general, el TDR describe un amplio rango de los sensores de medición eléctrica remota para determinar la localización y la naturaleza de varios reflectores. El TDR es similar en principio de radar que consiste en el transmisor de radiofrecuencia (el cual emite un pulso corto de energía electromagnética), una antena direccional, y un sensible receptor de la radiofrecuencia. Después que el transmisor direccional, y un

sensible receptor registra la generación de eco o la reflexión vuelta de un objeto distante tal como un aeroplano una nave. Midiendo el tiempo entre la transmisión y el recibo de reflexión y sabiendo la velocidad de la luz, la generación de eco puede revelar detalles adicionales del objeto de reflejo, que ayudan en la identificación.

La detección de líquidos es una aplicación emergente del TDR. Las interfaces líquidas producen reflexiones significativas en los cables huecos y porosos, que pueden ser detectados fácilmente. Esta observación ha conducido al uso de TDR para el escape y la detección de la contaminación a través de un cable selectivamente poroso, que permite vigilar grandes áreas con un solo cable.

Además, las técnicas de detección de la contaminación de nivel de fluidos han conducido al uso de TDR para medir los niveles de agua para propósitos hidrológicos, así como para la medida de las presiones del agua debajo de las presas.

2.2 Experiencias con el FD.

Las determinaciones exactas y no destructivas de la humedad y la densidad de la capa arable y otros horizontes profundos del suelo y manejo del mismo. Aunque ampliamente aceptada, la técnica de reflectometría de dominio de frecuencia (TDR) tiene una ventaja y limitaciones en la medición de la humedad.

Debido a lo anterior, se ha evaluado una técnica sencilla llamada dominio de frecuencia (FD) para medir humedad en estudios de labranza (Perdok, et al; s/f).

La evaluación consistió en relacionar y calibrar para tres tipos de suelo (arenoso, franco arenoso y arcilloso) la permitividad relativa (ϵ') con el contenido de humedad (w) y la densidad aparente (ρ).

Cuantificando el contenido de humedad en base a peso (w) en lugar de volumen (θ) fue de mucha utilidad para realizar los cálculos y calibración del modelo de relación entre la permitividad relativa (ϵ'), humedad (w) y la densidad (ρ). Una vez que el modelo de relación ha sido establecido (ϵ'), se puede medir con el instrumento (FD) y una de las variables independientes w ó ρ es determinada, entonces la otra puede ser calculada con bastante precisión.

Otras de las aplicaciones en el seguimiento de las fluctuaciones de humedad del contenido de humedad asumiendo que la densidad del suelo, es conocido y constante.

2.3 Importancia de conocer el estado de humedad del suelo en relación a la realización de labores.

El efecto de un implemento de labranza en el suelo depende principalmente de la humedad en el perfil del mismo (Spor, 1975). Por ello, es importante medir, calcular o predecir el estado de humedad en el suelo para que, al contrastarlo con los umbrales que delimitan los estados de humedad adecuados para trabajar un determinado tipo de suelo, se

opere la maquinaria sólo en la condición donde se obtengan los mejores resultados de las labores.

Las mediciones del contenido de agua para situar decisiones operacionales son muy importantes en sistemas de producción usando una fracción mecánica, en orden al evitar el deterioro del suelo y/o el derroche de energía cuando el estado de la humedad del suelo está en subóptima condición para labranza.

Para sistemas de producción con entrada de energía baja dentro de la tracción, tales como cuando se usa animales de tiro, decisiones operacionales son reguladas ellas mismas por la muy limitada disponibilidad de energía.

2.4 Problemas de Compactación.

Según Urquiza (2002) Señala que la compactación se manifiesta en la disminución de su porosidad (macro y micro poros), lo cual reduce el intercambio de la parte sólida del suelo con el aire y el agua en él contenidos y con la atmósfera circundante.

En consecuencia, se presentan condiciones de anaerobiosis tanto superficial como interna. La compactación puede generarse de forma natural, cuando ocurre el proceso de lixiviación de las partículas más finas del suelo, de los óxidos o hidróxidos de hierro y otros compuestos hacia el interior del perfil, debido al arrastre de las aguas. Estas partículas se depositan y taponan los poros del suelo, formando un horizonte cementado.

El hombre genera la compactación cuando no se adoptan las medidas necesarias en el manejo y aplicación de las labores agrícolas, esto es, cuando se aplica la mecanización con la humedad inadecuada en el suelo, el uso de equipos pesados, el sobrelaboreo, el uso de implementos a la misma profundidad durante años; todo esto trae como consecuencia la formación de una capa endurecida llamada también “piso de arado”.

2.5 Problemas de mala calidad de labores de labranza.

Los patrones de mecanización desarrollados en los sistemas convencionales de labranza, sobre todo las rastras de discos, provocan la desagregación del suelo y aceleran la oxidación de la materia orgánica, ocasionan además la aparición de capas de suelo pulverizado en la superficie para procurar una "cama apropiada" para las semillas y capas endurecidas en niveles más profundos, principalmente por la presión que ejercen los implementos, mencionado por Fuentes (1999) citado por Mrabet (2002).

Estas capas contribuyen a aumentar la degradación del suelo, limitando la penetración de las raíces, del agua y del aire, restringen la zona de nutrición de las plantas y por ende, disminuyen la capacidad productiva de los suelos e incrementan los requerimientos de potencia (y el consumo de combustible) de las máquinas encargadas de preparar los suelos.

La labranza de suelos con vertederas o discos está reduciendo la calidad del suelo afectando la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. Más frecuentemente, la labranza se realiza en suelos con bajos contenidos de

materia orgánica y nutrientes, y con peores propiedades físicas. La forma en que los suelos son cultivados hoy necesita ser reevaluados.

Las prácticas alternativas de labranza pueden promover el mejoramiento del suelo en términos de contenido de carbón y agregación.

Las prácticas agrícolas tradicionales han traído consigo consecuencias negativas en términos de conservación (de suelos, del agua y del ambiente en general). Esto se debe al uso inadecuado del suelo, al monocultivo y al uso de implementos de labranza inadecuados, que desnudan el suelo y lo pulverizan excesivamente; dejándolo en condiciones propicias para ser arrastrado por la lluvia. La utilización de tecnologías inadecuadas, no adaptadas al sitio (relieve, intensidad de las lluvias, etc.) provoca la escorrentía y, consecuentemente, la erosión y degradación de los suelos. Así, los métodos tradicionales de cultivo provocan la paulatina pérdida de fertilidad, hasta tornar los suelos improductivos.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Selección de los tipos de textura de suelo para el experimento.

Para evaluar el sistema de medición de humedad con el sistema de FD se seleccionaron áreas representativas bajo agricultura. La descripción de los suelos se realiza en términos de textura y contenido de materia orgánica.

3.2 Procedimiento para el seguimiento del contenido de humedad y permitividad relativa en los sitios experimentales.

3.2.1 Preparación y seguimiento del estado de humedad en los sitios experimentales.

Primeramente se adecuó un área para realizar las lecturas de permitividad relativa y porcentaje de humedad dentro de una parcela, por lo que se delimitó con bordos de 30 cm de altura, áreas de 5 x 2 m para poder ser regado por medio de inundación hasta la saturación del suelo.

Para dar seguimiento del contenido de humedad y permitividad relativa se realizaron dos series de mediciones para las dos texturas del suelo desde un estado casi saturado hasta el secado del suelo en forma natural.

Se tomaron 10 muestras de suelo para determinar humedad y paralelamente 10 lecturas de permitividad relativa; cada 24 horas, durante los primeros 7 y cada 12 horas en los siguientes 4 días, completando un total de 11 días, de muestreos.



Figura 3.1 Sitio de toma datos

3.3 Determinación del contenido de humedad y toma de lecturas de permitividad relativa

El contenido de humedad se determinó por el método gravimétrico calculando la humedad de la forma siguiente:

$$P_w = \left[\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right] 100$$

Donde:

P_w = Contenido de humedad (%)

P_{sh} = Peso del suelo húmedo (g)

P_{ss} = Peso del suelo seco (g)

Con un extractor de núcleos se obtuvieron 10 muestras a 5 cm de profundidad; para posteriormente colocar estas muestras en cilindros con la misma capacidad de contenido, se pesaron con una balanza con una precisión de 0.01 gr. (Psh), para después llevarlas a la estufa a una temperatura de 105 °C, durante un lapso de 24 horas. Transcurrido este tiempo, se sacaron para obtener el peso del suelo seco (Pss).

Con el fin de relacionar la lectura de permitividad relativa al contenido de humedad también se tomaron 10 lecturas paralelamente en cada textura del suelo, la lectura consiste en introducir el aparato a una profundidad de 6 cm del suelo, el sistema consiste en 3 barras de acero inoxidable, 2 mm de diámetro, 60 mm de largo espaciado y 10 mm de separado, en la cual la señal es manejada por un PC Standard y analizada después de un corto periodo de 2 a 3 segundos, pudiendo entregar el dato de permitividad relativa y así dar seguimiento en el tiempo durante un proceso normal de secado en campo.



Figura 3.2 Obtención de muestras de suelo y lecturas de permitividad relativa.

3.4 Densidad aparente

En la determinación de la densidad aparente (g/cm^3), se utilizó el método de la barrena de volumen conocido o extractor de núcleos, las muestras se determinaron a 5 cm de profundidad, primeramente se fueron acoplando uno a uno de los cilindros en la barrena para la extracción de los núcleos, luego se prosiguió a sacar las 10 muestras, teniendo cuidado de no disturbar dichas muestras, eliminando el exceso del suelo en los extremos de los cilindros, como se muestra la en la Figura 3.3.



Figura 3.3 Barrena de extractor de núcleos.

Como segundo paso, se trasladaron al laboratorio para poder pesarlas e inmediatamente compactarlas después para conocer la altura final de cada muestra de suelo.

Como tercer paso se colocaron las muestras en una estufa a 105° C, durante un tiempo de 24 horas, transcurrido el tiempo se retiraron de la estufa y se volvieron a pesar para obtener el peso del suelo seco. Obteniendo estos datos se calcula de la siguiente forma.

$$Da = \frac{P_{ss}}{3.1416 * R^2 * L}$$

Donde:

Da : Densidad aparente del suelo (g/cm³)

Pss : Peso del suelo seco (g)

R : Radio del cilindro metálico (cm)

L : Altura del cilindro metálico (cm)

3.5 Proceso de compactación.

Este proceso se realizó con el fin de relacionar el contenido de humedad con el aumento o disminución de la densidad del suelo, simulando una carga por el paso de maquinaria.

El proceso de compactación del suelo se realizó en el laboratorio de Fluhídica. Se utilizó una prensa neumática que funciona como simulador de los efectos de disminución de altura que sufre el suelo, tal y como se muestra la Figura 3.4.



Figura 3.4 Prensa neumática (simulador de compactación)

Primero se calibra el equipo, ajustando dos reguladores de presión en serie para obtener 4 bares de presión para todas las muestras, este valor ha sido utilizado en otros trabajos, para simular la carga por el paso de maquinaria (Perdok and Hendriksen, 1982).

Como segundo paso se fueron colocando uno a uno los cilindros en una placa guía (ranura que se encuentra exactamente por debajo de la caída del pistón) aplicando una energía de compactación definida, sufriendo entonces la reducción de altura.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Ubicación geográfica.

El presente trabajo de investigación se desarrollo en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria “Antonio Narro”, que se encuentra ubicado en la ex hacienda 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.

4.2 Descripción de los suelos utilizados en el experimento.

Los suelos utilizados para el experimento, de acuerdo al porcentaje de arcilla, limo y arena, se clasifica uno como de textura franca arenosa y el otro como franca arcillosa. En el cuadro 4.2 se muestra el contenido de arcilla, limo y arena, así como de materia orgánica de los tipos de suelos.

Cuadro 4.1 Texturas de los suelos de las áreas agrícolas representativas en el campo experimental de la “UAAAN” (Valdés, 1985).

Clasificación textural	Profundidad (cm.)	Composición Textural %			% de Materia orgánica
		Arcilla	Limo	Arena	
Franco arenosa	0-38	16	26	58	1.2
Franco arcillosa	0-30	32	42	28	1.9

4.3 Resultados del seguimiento del contenido de humedad y permitividad relativa del suelo.

Como se menciona en los materiales y métodos para dar seguimiento a los valores de humedad y permitividad relativa se realizaron dos series de mediciones para los dos diferentes tipos de texturas de suelos. La primera serie se realizó cada 24 horas y la segunda cada 12 horas.

4.3.1 Comportamiento de la humedad del suelo de textura franca arenosa.

En la Figura 4.1, se muestra la primera serie de humedad del perfil del suelo, se puede observar que partiendo de un suelo húmedo casi saturado, por medio de inundación, el porcentaje de humedad gravimétrica disminuye en el tiempo hasta alcanzar un contenido de humedad tendiendo a ser constante alrededor de 13.23 por ciento a partir de las 120 horas.

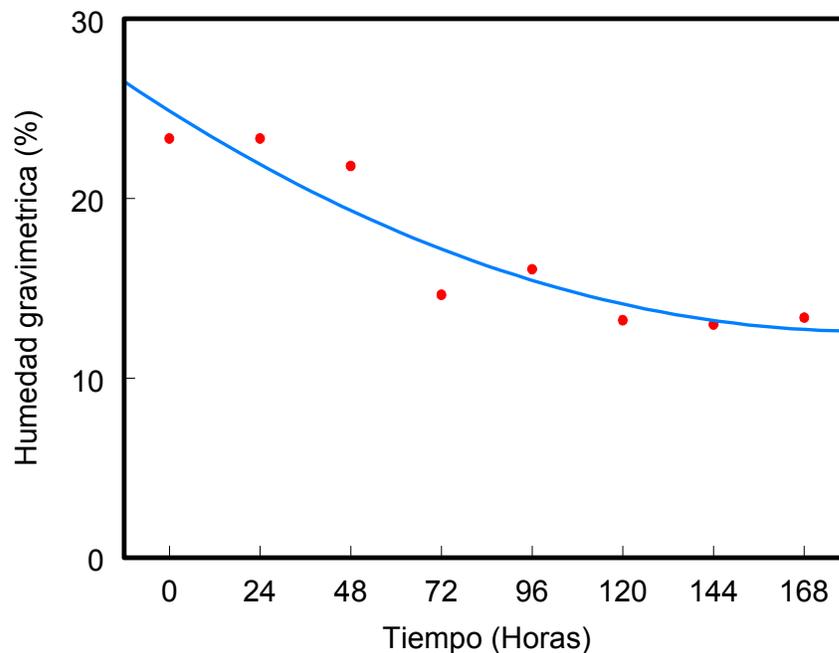


Figura 4.1 Valores promedios de humedad para la primera serie de medición

En la Figura 4.2, se muestra el comportamiento de los valores promedio de humedad obtenidos en una segunda serie de medición donde el contenido de humedad se empieza a estabilizar alrededor de las 96 horas, en este caso se realizaron 2 veces al día.

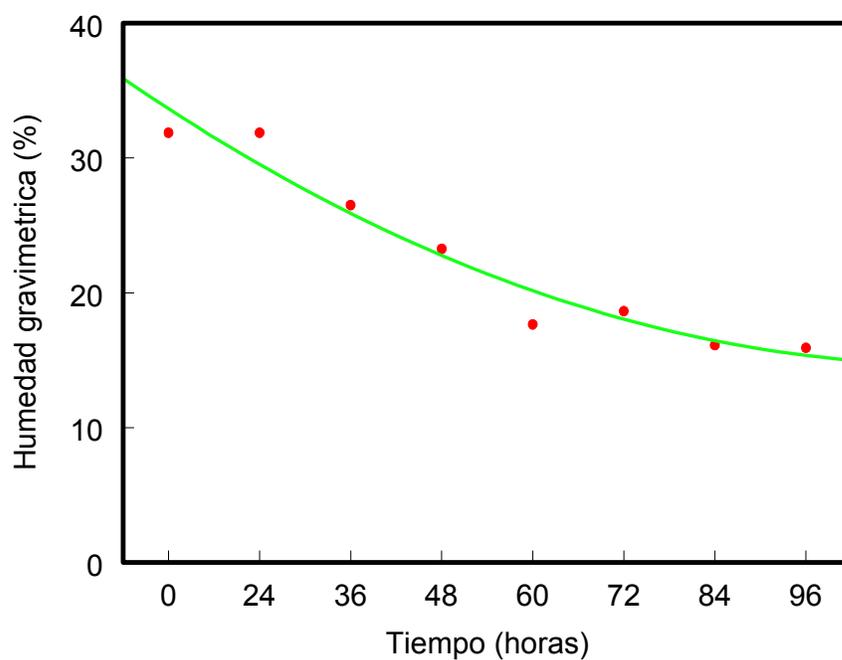


Figura 4.2 Comportamiento de los valores promedio de humedad obtenidos en una segunda serie de medición.

Como se puede observar en las dos series se obtuvieron tendencias muy similares al comportamiento del contenido de humedad del suelo con el tiempo.

4.3.2 Comportamiento de las lecturas de permitividad relativa de textura franca arenosa.

La permitividad relativa se determino al mismo tiempo que se tomaron las muestras de suelo para determinar el contenido de humedad.

En la Figura 4.3, se muestra la permitividad relativa para la primera serie de medición en un suelo franco arenoso, se observa que tiende a disminuir la permitividad alrededor de las 120 horas; debido esto a que el suelo va perdiendo humedad.

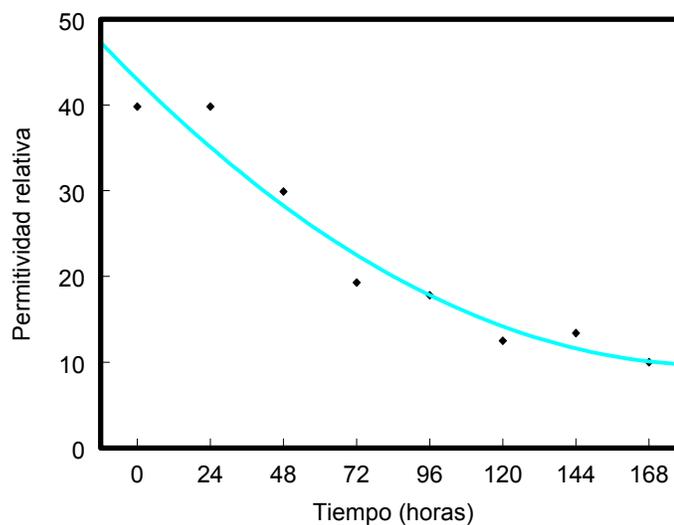


Figura 4.3 Permitividad relativa para la primera medición.

En la Figura 4.4, se muestran los valores promedio de permitividad relativa, en la segunda serie de medición donde la permitividad relativa tiende a bajar a 17.8, alrededor de las 96 horas.

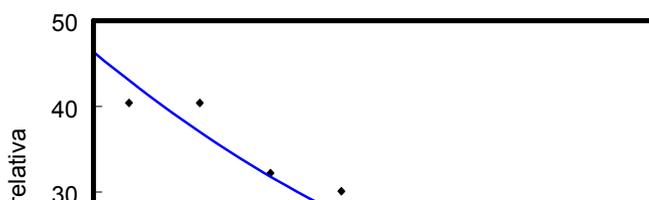
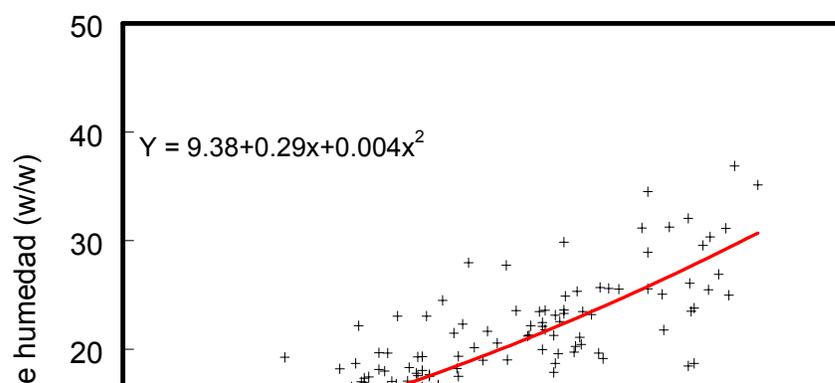


Figura 4.4 Comportamiento de la permitividad relativa para la segunda medición.

4.3.3 Comportamiento de la relación de datos de humedad y permitividad relativa del suelo de textura franca arenosa.

En la Figura 4.5, se muestra la relación de datos de humedad y permitividad relativa del perfil de suelo, a partir de datos tomados en campo.

La relación polinomial de segundo orden entre la predicción de los valores obtenidos en campo, se representa con un coeficiente de correlación $r = 0.84$. Esto significa que existe una relación adecuada y que tomando datos en campo de permitividad relativa, permite estos datos en el modelo polinomial proporcione una relación, pudiendo obtener valores de humedad que nos sirven como apoyo a las decisiones de operación de la maquinaria agrícola.



$$r = 0.84$$

Figura 4.5 Relación entre los valores de humedad y de permitividad relativa en un suelo franco arenoso.

4.3.4 Comportamiento de la densidad aparente al simular compactación a diferentes contenidos de humedad del suelo de textura franca arenosa.

En la Figura 4.6 se muestra el comportamiento de los valores promedio de densidad aparente en el perfil del suelo con respecto a los diferentes porcentajes de humedad. Entre más húmedo este un suelo, existe mayor compactación, cuando tiene un valor entre 1.08 y 1.20 de densidad aparente existe menor compactación, con un porcentaje de humedad de 15.76 y cuando alcanza un porcentaje de humedad de 31.87, con un valor de densidad aparente entre 1.18 y 1.32 existe problemas de compactación del suelo.

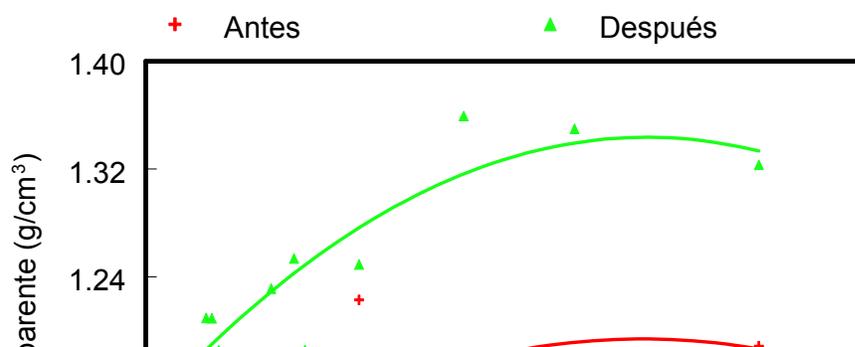


Figura 4.6 Valores promedio de densidad aparente en un suelo franco arenoso (antes y después de la compactación).

4.3.5 Comportamiento de la humedad en el suelo de textura arenosa.

En la Figura 4.7 se muestra la primera serie de medición, se observa cuando alcanza un contenido de humedad de 13.19 por ciento tiende a ser constante y empieza a estabilizarse a las 72 horas realizando mediciones cada 24 horas.

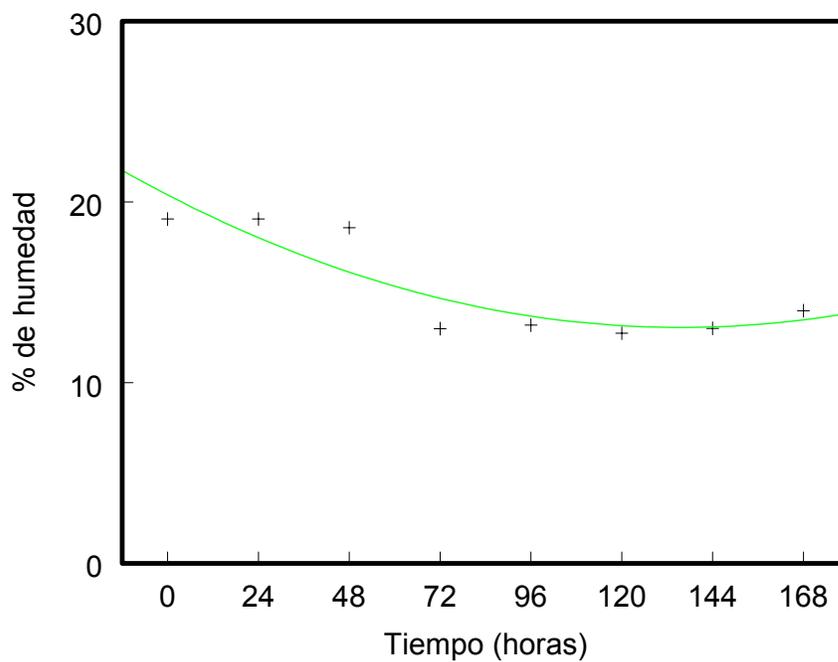


Figura 4.7 Comportamiento de la humedad para la primera medición.

En la Figura 4.8, se muestra que alrededor de un 15.18 por ciento de humedad tiende a estabilizarse a las 60 horas, efectuando el muestreo 2 veces al día.

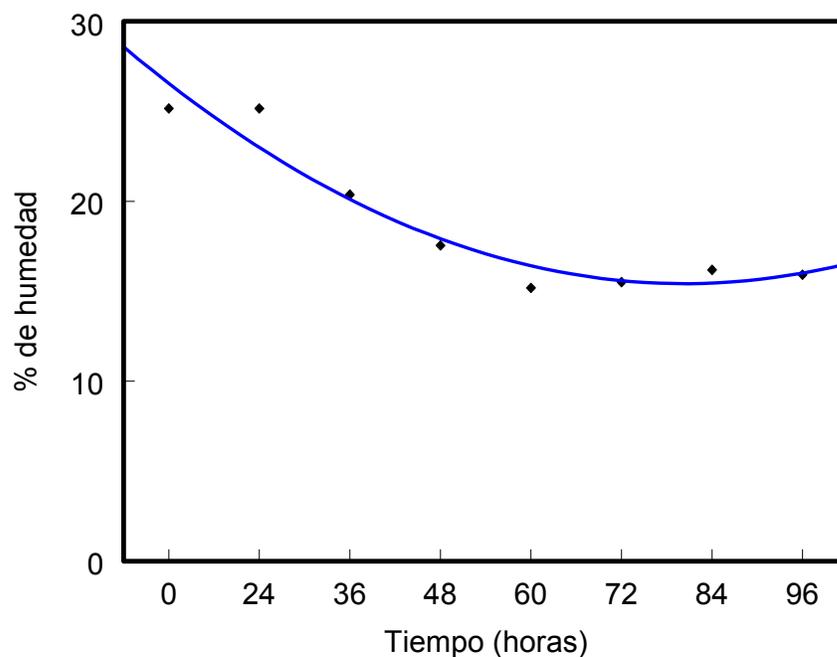
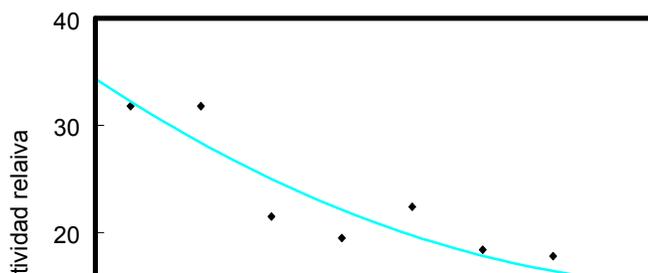


Figura 4.8 Comportamiento de la humedad de un suelo franco arenoso.

4.3.6 Comportamiento de las lecturas de permitividad relativa del suelo de textura franca arcillosa.

En la Figura 4.9, se muestra el comportamiento de la permitividad relativa medido en un suelo franco arcilloso cada 24 horas, tiende a bajar alrededor de las 96 horas y con una permitividad relativa de 14



4.9 Comportamiento de la Permitividad relativa para la primera medición.

En la Figura 4.10, se muestra que la curva de la permitividad relativa, empieza a disminuir con respecto al tiempo hasta alcanzar una permitividad de 17.1, tomando datos cada 12 horas.

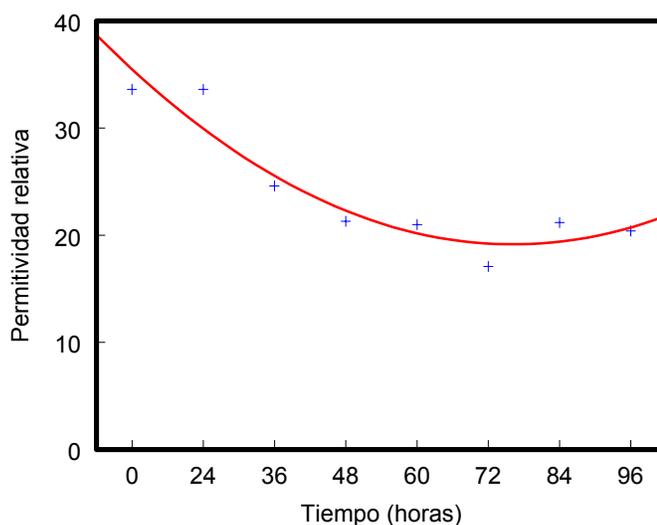


Figura 4.10 Comportamiento de la permitividad relativa.

4.3.7 Comportamiento de los resultados obtenidos de contenido de humedad y permitividad relativa de la textura franca arcillosa.

En la Figura 4.11, se muestra el comportamiento de la permitividad relativa y el contenido de humedad en el suelo franco arcilloso, a partir de datos tomados en campo.

El modelo que nos representa la relación en este suelo, es una polinomial de segundo orden se obtuvo un coeficiente de correlación de $r = 0.78$, esto significa que hay una relación adecuada y obteniendo datos de permitividad relativa y valores de humedad nos servirán como apoyo a las decisiones de operación de la maquinaria agrícola en cualquier punto, sustituyendo la permitividad relativa en la ecuación $y = 6.76 + 0.47x - 0.007x^2$, y así poder predecir el contenido de humedad en suelo.

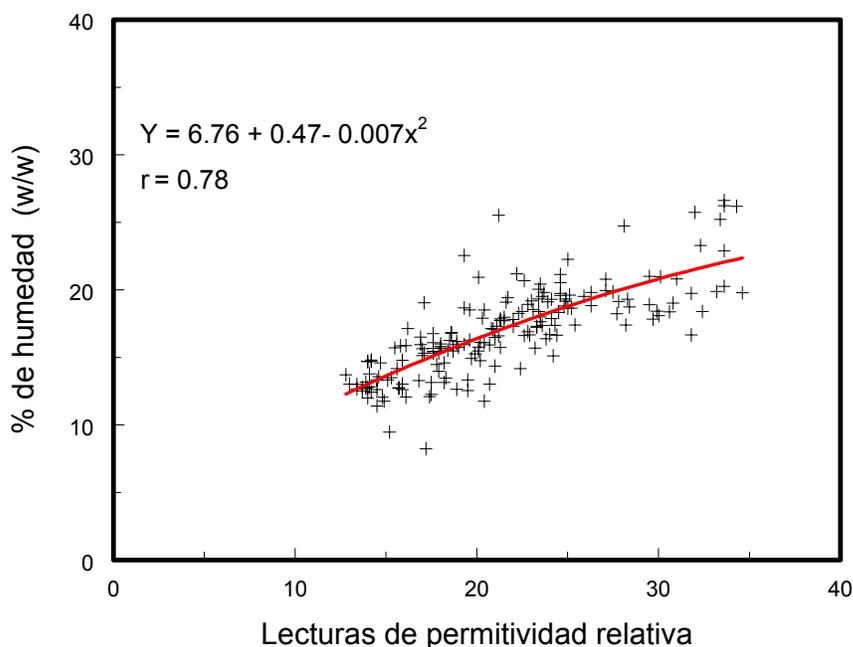


Figura 4.11 Relación entre los valores de humedad y permitividad relativa en el suelo franco arcilloso.

4.3.8 Comportamiento de la densidad aparente al simular compactación a diferentes contenidos de humedad del suelo de textura franca arcillosa.

En la Figura 4.12 se muestra que la densidad en suelo franco arcilloso con una densidad aparente entre valores 1.21 y 1.26, en este suelo existe menor compactación comparado con un suelo franco arenoso.

El valor más alto que se obtuvo de contenido de humedad fue de 25.16 por ciento, y se observa que existe menor compactación, debido a la humedad del suelo.

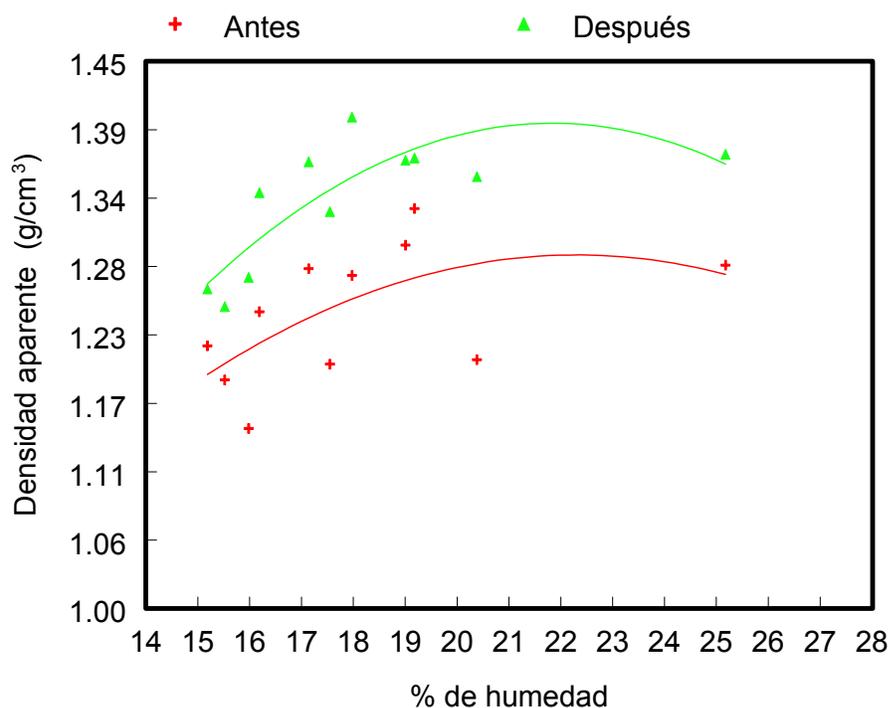


Figura 4.12 Tendencia de la densidad aparente en el perfil del suelo franco arcilloso (antes y después de la compactación).

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES

- En base a los resultados obtenidos en campo de la relación entre el contenido de humedad en las dos texturas de suelo y las lecturas de permitividad relativa, por el método FD, se concluyó que se puede representar adecuadamente la humedad con las lecturas de permitividad relativa.
- Con base al objetivo establecido se puede concluir que el sistema de medición de permitividad relativa es confiable, ya que para un suelo de textura franca arenoso se obtuvo un coeficiente de correlación de $r = 0.84$, y de textura franco arcillosa de $r = 0.78$. Esto significa que existe una relación adecuada y que tomando nos permite construir modelos empíricos para cada suelo en particular y utilizarlos como herramienta para permitirnos predecir el contenido de humedad en valores aceptables.
- En base a la hipótesis establecida, se puede concluir que el sistema FD proporciona información cuantitativa confiable a nivel operacional, para decisiones que involucren el empleo de la maquinaria agrícola en la realización de las labores de la labranza.

RECOMENDACIONES

- Dentro del aspecto de las recomendaciones se sugiere que los agricultores se les informe acerca del uso del FD para determinar las condiciones de humedad que debe tener el suelo, para poder realizar labores agrícolas con una mejor calidad de trabajo.
- Otras de las recomendaciones, es que el sistema que se maneja para medir la permitividad relativa se utilice con mayor cuidado, con la finalidad de evitar lecturas y datos erróneos.
- Realizar mayor número de pruebas de campo en otras texturas de suelo.

VI. LITERATURA CITADA

Aguilera, C. M. 1996. Relaciones agua – suelo – planta – atmósfera. 4^{ta}. Edición. Universidad Autónoma Chapingo.

Fabregat, S. F., Ferriols, N. S., García, B. G. 1999. Estudio de los diferentes estados energéticos de agua del suelo en función de los fenómenos de relajación dieléctrica. Estudios de la Zona Saturada del Suelo. Eds. R. Muñoz-Carpena, A. Ritter., C, Tascón. ICIA: Tenerife. Universitat Jaume I. Departament de Ciències Experimentals, 12080 Castelló, España.

Franzluebbers, A.J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil & Tillage Research. 66, 95-106.

[www.manejo_sostenible](http://www.manejo_sostenible.de_suelos-monografias_com.htm) de suelos-monografias_com.htm. Accesada 14 julio 2044.

Gavande, S. A. 1973. Física de Suelos: principios y aplicaciones. Editorial Limusa. México.

Gardner, W. R. 1986. Física de Suelos. Ed. UTEHA. México.

Gutiérrez, M. J. 2001. Comparación de cinco métodos para determinar la humedad en el suelo. Tesis de Licenciatura. UAAAN. Buenavista Saltillo, Coah. México.

Honorato, P. R. 2000. Manual de Edafología. 210 -211. Universidad Católica de Chile. 4ª Edición.

Narro, F. E. 1994. Física de Suelos: Con Enfoque Agrícola. "Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". 1ª Edición.

Malagon, D. 1976. Física de suelos. Bogotá, Calif. IGAC

Miles, D. L. 1998. Estimación de la Humedad del Suelo. Ingeniero en Extensión Cooperativa deniego de la Universidad del Estado de Colorado.

Perdok, U.D.; Kroesbergen B. and Hilhorst M.A. The influence of water content and bulk density on the dielectric properties of soil as determined by the frequency domain technique. Wageningen Agricultural University, Department of Soil tillage. S/F.

Perdok, U.D. and L. M. Hendrikse, 1982. Workability test procedure for arable land. Proceedings of the 9th Int Conf. ISTRO, pp. 70, Osijek, Yugoslavia.

Spoor, G. and R. J. Godwin, 1975. Fundamental aspects of cultivations. In Soil physical conditions and crop production. 79-81 Technical Bulletin 29. Ministry of Agriculture Fisheries and Food. H.M.S.O. London, U.K.

Toop, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. Water Resour.

Urquiza, R. M. N. 2002. Manejo Sostenible de Suelos. Especialista del Centro de información, Gestión y Educación ambiental. Universidad Autónoma Chapingo.
www.medioambiente.cu/deselac/douwloads/compendio%20Manejo%20Sotenible%20de%20desuelos.pdf. Accesada 15 junio 2004

Van Bavel, C.H.M., Underwood, N. and Swanson, R.W. 1956. Soil moisture measurement by neutron moderation.

VII. ANEXOS

**Medición de la humedad y permitividad relativa en el perfil del suelo franco arcilloso.
"Estación San Juan"**

Primera serie de medición, cada 24 horas

Fecha: 29 de mayo 2004

Datos obtenidos a las 9:00 de la mañana

Cuadro 1.1

No. Frasco	Peso del Frasco	Psh más el Frasco	Pss más el Frasco	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad Relativa
1	91.0	256.9	231.8	165.9	140.8	17.83	29.7
2	90.7	241.1	216.4	150.4	125.7	19.65	31.8
3	89.6	246.4	220.4	156.8	130.8	19.88	33.2
4	90.7	266.0	235.8	175.3	145.1	20.81	31.0
5	85.1	266.8	236.3	181.7	151.2	20.17	34.6
6	82.0	241.1	214.3	159.1	132.3	20.26	33.6
7	82.6	248.1	222.4	165.5	139.8	18.38	30.6
8	83.4	238.6	213.8	155.2	130.4	19.02	30.8
9	83.9	273.0	243.6	189.1	159.7	18.41	32.4
10	91.0	285.0	257.3	194.0	166.3	16.66	31.8

Psh; peso de suelo húmedo, Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.2

Fecha: 30 de mayo 2004

Datos obtenidos a las 9:00 de la mañana

No. Frasco	Peso del Frasco	Psh más el Frasco	Pss más el Frasco	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
1	83.5	233.5	212.1	150.0	128.6	16.64	24.4
2	82.3	220.6	200.9	138.3	118.6	16.61	22.6
3	70.3	207.6	186.0	137.3	115.7	18.67	19.3
4	89.3	250.1	225.1	160.8	135.8	18.41	22.5
5	81.2	257.8	228.3	176.6	147.1	20.05	23.4
6	94.0	243.2	218.6	149.2	124.6	19.74	24.6
7	91.7	255.1	228.9	163.4	137.2	19.10	21.6
8	88.8	242.4	217.0	153.6	128.2	19.81	23.7
9	84.0	218.8	197.1	134.8	113.1	19.19	23.0
10	89.5	247.7	223.9	158.2	134.4	17.71	21.5

Psh; peso de suelo húmedo, Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.3

Fecha: 31 de mayo 2004

Datos obtenidos a las 9:00 de la mañana

No. Frasco	Peso del Frasco	Psh más el Frasco	Pss más el Frasco	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
1	82.6	221.9	203.6	139.3	121.0	15.12	24.2
2	84.2	221.5	206.2	137.3	122.0	12.54	19.5
3	83.5	219.0	204.2	135.5	120.7	12.26	17.5

4	83.3	228.7	212.4	145.4	129.1	12.63	18.9
5	83.8	219.3	204.7	135.5	120.9	12.08	17.4
6	72.7	204.0	188.4	131.3	115.7	13.48	18.3
7	81.5	220.8	210.2	139.3	128.7	8.24	17.2
8	82.2	226.5	205.4	144.3	123.2	17.13	16.2
9	83.9	218.1	202.5	134.2	118.6	13.15	17.5
10	84.0	214.1	198.8	130.1	114.8	13.33	19.5

Psh; peso de suelo húmedo, Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.4

Fecha: 01 de junio 2004

Datos obtenidos a las 9:00 de la mañana

No. Frasco	Peso del Frasco	Psh más el Frasco	Pss más el Frasco	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
1	81.3	210.5	196.6	129.2	115.3	12.06	16.1
2	70.2	242.5	227.6	172.3	157.4	9.47	15.2
3	85.1	205.0	191.2	119.9	106.1	13.01	15.9
4	83.2	210.6	194.8	127.4	111.6	14.16	15.6
5	82.6	208.1	193.4	125.5	110.8	13.27	16.8
6	94.0	233.0	215.1	139.0	121.1	14.78	15.9
7	76.7	216.0	200.3	139.3	123.6	12.70	15.7
8	88.8	205.9	190.5	117.1	101.7	15.14	17.0
9	77.4	215.1	199.1	137.7	121.7	13.15	18.2
10	82.3	241.1	221.4	158.8	139.1	14.16	22.4

Psh; peso de suelo húmedo,
Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.5

Fecha: 02 de junio 2004

Datos obtenidos a las 9:00 de la mañana

No. Frasco	Peso del Frasco	Psh más el Frasco	Pss más el Frasco	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
1	72.7	214.0	197.2	141.3	124.5	13.49	15.3
2	76.3	214.7	199.1	138.4	122.8	12.70	13.9
3	82.4	228.3	211.9	145.9	129.5	12.66	13.4
4	82.3	221.9	206.9	139.6	124.6	12.04	14.8
5	78.0	211.0	197.0	133.0	119.0	11.76	14.9
6	84.0	217.2	202.1	133.2	118.1	12.79	13.7
7	83.6	221.1	205.7	137.5	122.1	12.61	14.5
8	83.0	219.9	205.9	136.9	122.9	11.39	14.5
9	77.7	227.7	211.0	150.0	133.3	12.53	13.7
10	88.2	257.6	234.8	169.4	146.6	15.55	18.4

Psh; peso de suelo húmedo,
Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.6

Fecha: 03 de junio 2004

Datos obtenidos a las 9:00 de la mañana

No. Frasco	Peso del Frasco	Psh más el Frasco	Pss más el Frasco	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
1	85.1	246.7	229.4	161.6	144.3	11.99	14.0
2	83.8	217.4	202.0	133.6	118.2	13.03	13.0
3	83.3	227.6	211.0	144.3	127.7	13.00	13.4
4	81.3	241.4	222.0	160.1	140.7	13.79	14.1
5	83.2	227.7	210.7	144.5	127.5	13.33	15.1
6	94.1	244.9	228.0	150.8	133.9	12.62	15.9
7	83.6	238.8	221.2	155.2	137.6	12.79	14.0
8	82.4	228.3	211.7	145.9	129.3	12.84	14.1
9	89.4	249.5	231.8	160.1	142.4	12.43	14.2
10	76.8	223.2	204.7	146.4	127.9	14.46	17.8

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.7

Fecha: 04 de junio 2004

Datos obtenidos a las 9:00 de la mañana

No. Frasco	Peso del Frasco	Psh más el Frasco	Pss más el Frasco	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
------------	-----------------	-------------------	-------------------	----------	----------	--------------	-----------------------

	Frasco	Frasco	Frasco				
1	72.6	210.4	193.8	137.8	121.2	13.70	12.8
2	82.3	234.3	217.1	152.0	134.8	12.76	15.7
3	77.6	228.8	211.2	151.2	133.6	13.17	13.9
4	76.3	220.7	203.7	144.4	127.4	13.34	14.5
5	81.8	229.9	212.2	148.1	130.4	13.57	14.6
6	83.2	226.9	208.6	143.7	125.4	14.59	14.7
7	83.7	234.3	215.0	150.6	131.3	14.70	14.0
8	77.4	227.0	207.7	149.6	130.3	14.81	14.2
9	76.1	226.6	207.3	150.5	131.2	14.71	14.2
10	76.1	224.5	205.5	148.4	129.4	14.68	14.0

Psh; peso de suelo húmedo,
Pss; peso de suelo seco

Segunda serie de medición cada 12 horas

Cuadro 1.8

Fecha: 09 de junio 2004

Datos obtenidos a las 8:30 de la mañana

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
315	75.2	243.6	217.8	168.4	142.6	18.00	30.0
287	81.6	244.5	218.6	162.9	137.0	18.91	29.5
143	82.2	252.2	229.1	170.0	141.9	19.80	26.3
71	86.1	253.0	226.0	166.9	139.9	19.39	28.3
146	87.0	256.7	226.4	169.9	142.4	19.37	29.9
151	88.2	249.4	220.6	170.3	142.4	19.52	25.9
138	83.6	251.1	223.1	167.3	141.3	18.76	28.4
130	83.1	243.4	219.8	162.3	136.7	18.73	28.4
131	87.4	253.9	226.6	166.3	139.2	19.01	25.1
153	82.4	248.5	220.9	166.1	138.5	19.93	27.5
312	83.4	248.2	221.5	164.8	138.1	19.33	23.4
156	82.6	250.4	223.2	167.5	140.6	19.13	27.8
45	83.4	247.0	222.8	169.8	140.4	18.67	25.8
288	83.0	255.5	228.8	168.5	147.8	18.82	26.8
299	86.0	254.9	228.5	168.1	141.7	18.63	25.2
148	87.3	261.6	232.6	174.3	145.3	19.96	27.1
319	85.5	272.9	244.0	187.4	158.5	18.23	27.7
44	83.5	262.2	231.2	178.7	147.8	20.91	30.1

Cuadro 1.9

Fecha: 09 de junio 2004
 Datos obtenidos a las 5:30 de la tarde
 suelo seco

Cuadro 1.10

Fecha: 10 de junio 2004

Datos obtenidos a las 8:00 de la mañana

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
129	86.1	249.8	223.6	163.7	137.5	19.05	17.1
79	87.7	251.8	225.1	164.1	137.4	19.43	21.7
134	83.2	261.9	230.7	178.7	147.5	21.15	24.6
309	86.7	247.1	221.7	160.4	135.0	18.81	24.8
147	79.4	226.7	205.4	147.3	126.0	16.90	22.8
303	85.0	242.6	226.0	157.6	141.0	11.77	20.4
310	86.3	246.5	222.6	160.2	136.3	17.53	24.3
282	83.7	246.2	219.9	162.5	136.2	19.31	24.1
295	87.4	254.7	229.9	167.3	142.5	17.40	25.4
64	85.7	251.7	226.0	166.0	140.3	18.32	24.5

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.11

Fecha: 10 de junio 2004

Datos obtenidos a las 6:00 de la tarde

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
75	83.3	241.8	219.5	158.5	136.2	16.37	23.8
137	87.2	249.5	227.2	162.3	140.0	15.93	20.7
56	87.1	259.4	234.2	172.3	147.1	17.13	20.8
67	84.1	247.8	224.4	163.7	140.3	16.68	24.0
49	86.3	242.7	221.5	156.4	135.2	15.68	23.2
55	82.5	245.2	221.2	162.7	138.7	17.30	23.3
61	84.6	243.8	220.2	159.2	135.6	17.40	28.2
52	83.6	245.8	221.2	162.2	137.6	17.88	24.1
316	85.4	250.2	223.5	164.8	138.1	19.33	24.9
68	84.7	246.0	221.8	161.3	137.1	17.65	23.5

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.12

Fecha: 18 de junio 2004

Datos obtenidos a las 7:30 de la mañana

No. Cilindro	Peso el cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
308	84.5	264.8	231.2	180.3	146.7	22.90	33.6
289	87.2	263.6	227.5	176.4	140.3	25.73	32.0
291	85.1	262.9	226.0	177.8	140.9	26.19	34.3
154	84.2	253.7	221.7	169.5	137.5	23.27	32.3
41	85.9	254.8	220.8	168.9	134.9	25.20	33.4
50	84.4	250.4	215.9	166.0	131.5	26.24	33.6
S/N	77.4	255.3	217.2	177.9	139.8	27.25	33.6

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.13

Fecha: 18 de junio 2004

Datos obtenidos a las 5:30 de la tarde

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
59	84.0	229.9	208.3	145.9	124.3	17.38	23.6
125	87.1	242.6	218.6	155.5	131.3	18.25	22.3
281	83.7	247.3	220.5	163.6	136.8	19.59	24.6
302	83.3	244.8	215.4	161.5	132.1	22.26	25.0
46	87.1	242.7	217.3	155.6	130.2	19.51	23.6
51	85.2	241.6	216.5	156.4	131.3	19.12	23.9
156	83.4	247.7	214.3	164.3	130.9	25.52	21.2
142	87.5	229.1	204.6	141.6	117.1	20.92	20.1
76	83.3	250.1	221.5	166.8	138.2	20.69	22.6
288	83.8	243.4	216.2	159.6	132.4	20.54	24.6

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.14

Fecha: 19 de junio 2004

Datos obtenidos a las 8:00 de la mañana

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
75	83.2	241.0	217.7	157.8	134.5	17.32	22.0
56	87.0	241.0	219.0	154.0	132.0	16.67	22.9
67	83.9	244.4	221.7	160.5	137.8	16.47	21.0
150	83.8	228.9	206.2	145.1	122.4	18.55	23.1
49	86.2	239.7	215.7	153.5	129.5	18.53	20.4
45	83.1	232.3	210.3	149.2	127.2	17.30	21.1
153	83.9	233.5	211.5	149.6	127.6	17.24	23.3
129	85.9	240.1	216.8	154.2	130.9	17.80	22.0
282	83.6	236.9	213.8	15.3	130.2	17.74	21.3
61	84.6	236.4	213.4	151.8	128.8	17.86	21.3

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.15

Fecha: 19 de junio 2004

Datos obtenidos a las 6:00 de la tarde

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
47	84.7	224.9	205.6	140.2	120.9	15.96	19.3
147	79.0	227.6	207.7	148.6	128.7	15.46	20.1
287	83.5	243.7	223.1	160.2	139.6	14.76	20.2
303	85.1	242.8	221.4	157.7	136.3	15.70	15.5
146	87.0	245.7	223.8	158.7	136.8	16.01	18.0
138	83.8	243.9	222.7	160.1	138.9	15.26	19.9
143	83.9	225.9	206.9	142.0	123.0	15.45	17.6
44	83.5	231.9	213.7	148.4	130.2	13.98	17.9
310	86.1	227.0	208.7	140.9	122.6	14.93	19.7
319	85.5	245.7	225.6	160.2	140.1	14.35	21.0

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.16

Fecha: 20 de junio 2004

Datos obtenidos a las 7:30 de la mañana

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
151	79.5	228.7	207.9	149.2	128.4	16.20	18.9
79	87.2	244.9	223.2	157.7	136.0	15.96	16.9
130	84.5	230.8	211.2	146.3	126.7	15.47	18.7
64	85.5	224.3	205.5	138.8	120.0	15.67	17.6
312	83.4	231.5	211.8	148.1	128.4	15.34	17.9
52	83.6	234.0	214.0	150.4	130.4	15.34	17.6
71	87.5	235.5	215.5	148.0	128.0	15.63	17.0
131	87.4	235.9	217.0	148.5	129.6	14.58	18.2
295	87.3	245.1	223.7	157.8	136.4	15.69	18.0
55	82.4	224.0	205.2	141.6	122.8	15.31	17.1

Psh; peso de suelo húmedo,

Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.17

Fecha: 20 de junio 2004

Datos obtenidos a las 6:30 de la tarde

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
65	84.3	236.4	215.1	152.1	130.8	16.28	19.6
41	85.9	247.2	225.3	161.3	139.4	15.71	18.7
S/n	77.5	232.3	211.0	154.8	133.5	15.96	18.9
136	83.3	242.7	220.6	159.4	137.3	16.10	20.4
66	84.4	248.5	226.2	164.1	141.8	15.73	21.3
48	83.5	251.0	228.2	167.5	144.7	15.76	20.1
154	84.2	224.0	205.0	139.8	120.8	15.73	19.0
122	84.6	252.5	229.2	167.9	144.6	16.11	20.2
141	84.7	258.5	232.1	173.8	147.4	17.91	20.3
50	84.4	209.4	191.6	125.0	107.2	16.60	21.2

Psh; peso de suelo húmedo,
Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.18

Fecha: 21 de junio 2004

Datos obtenidos a las 8:00 de la mañana

No. Cilindro	Peso del cilindro	Psh más el cilindro	Pss más el cilindro	Psh (gr)	Pss (gr)	% de humedad	Permitividad relativa
292	84.2	220.9	202.2	136.7	118.0	15.85	18.1
43	86.0	237.5	215.7	151.5	129.7	16.81	18.9
70	83.1	233.7	212.0	150.6	128.9	16.83	19.4
290	80.4	226.2	206.3	145.8	125.9	15.81	20.4
72	86.8	232.6	212.2	145.8	125.4	16.27	17.7
76	83.3	220.3	201.3	137.0	118.0	16.10	17.3
146	87.1	231.4	210.7	144.3	123.6	16.75	17.8
303	85.0	224.4	205.3	139.4	120.3	15.88	19.1
282	83.6	226.2	206.0	142.6	122.4	16.50	20.5
316	85.5	234.0	216.9	148.5	131.4	13.01	20.4

Psh; peso de suelo húmedo,
Pss; peso de suelo seco

**Medición de la densidad aparente del suelo franco arcilloso.
“Estación San Juan”**

Cuadro 1.1

No. Cilindro	Peso cilindro (gr)	Psh (gr)	Pss (gr)	Radio (cm)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Reducción Altura (cm)	Valor de Pi	Da inicial (g/cm ³)	Da final (g/cm ³)
308	84.5	180.3	146.7	2.6	5.1	4.84	0.265	3.14	1.35	1.43
289	87.2	176.4	140.3	2.6	5.1	4.80	0.300	3.14	1.30	1.38
291	85.1	177.8	140.9	2.6	5.1	4.82	0.285	3.14	1.30	1.38
154	84.2	171.6	134.2	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.27	1.41
41	85.9	168.9	134.9	2.6	5.1	4.74	0.365	3.14	1.25	1.34
50	84.4	166.0	131.5	2.6	5.1	4.65	0.450	3.14	1.21	1.33
s/n	77.4	177.9	140.5	2.6	5.1	4.88	0.225	3.14	1.30	1.36

Fecha: 18 de junio 2004
 Datos obtenidos a las 7 de la mañana

Psh; peso del suelo húmedo; Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.2

Fecha: 18 de junio 2004

Datos obtenidos a las 7 de tarde

No. Cilindro	Peso cilindro (gr)	Psh (gr)	Pss (gr)	Radio (cm)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Reducción Altura (cm)	Valor de Pi	Da inicial (g/cm ³)	Da final (g/cm ³)
59	84.0	145.9	124.3	2.6	5.1	4.45	0.650	3.14	1.15	1.32
125	87.1	155.5	131.5	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.21	1.35
281	83.7	163.6	136.8	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.26	1.40
302	83.3	161.5	132.1	2.6	5.1	4.40	0.700	3.14	1.22	1.41
46	87.1	155.6	130.2	2.6	5.1	4.70	0.400	3.14	1.20	1.30
51	85.2	156.4	131.3	2.6	5.1	4.59	0.510	3.14	1.21	1.35
156	83.4	164.3	130.9	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.21	1.34
142	87.5	141.6	117.1	2.6	5.1	4.35	0.750	3.14	1.08	1.27
76	83.3	166.8	138.2	2.6	5.1	4.59	0.510	3.14	1.28	1.42
288	83.8	159.6	132.4	2.6	5.1	4.45	0.650	3.14	1.22	1.40

Psh; peso de suelo húmedo; Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.3

Fecha: 19 de junio 2004

Datos obtenidos a las 7 de mañana

No. Cilindro	Peso cilindro (gr)	Psh (gr)	Pss (gr)	Radio (cm)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Reducción Altura (cm)	Valor de Pi	Da inicial (g/cm ³)	Da final (g/cm ³)
75	83.2	157.8	134.5	2.6	5.1	4.72	0.380	3.14	1.24	1.34
56	87.0	154.0	132.0	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.22	1.35
67	83.9	160.5	137.8	2.6	5.1	4.45	0.650	3.14	1.27	1.46
150	83.8	145.1	122.4	2.6	5.1	4.47	0.630	3.14	1.13	1.29
49	86.2	153.5	129.5	2.6	5.1	4.70	0.400	3.14	1.20	1.30
45	83.1	149.2	127.2	2.6	5.1	4.65	0.450	3.14	1.17	1.29
153	83.9	149.6	127.6	2.6	5.1	4.55	0.550	3.14	1.18	1.32
129	85.9	154.2	130.9	2.6	5.1	4.72	0.380	3.14	1.21	1.31
282	83.6	153.3	130.2	2.6	5.1	4.65	0.450	3.14	1.20	1.32
61	84.6	151.8	128.8	2.6	5.1	4.69	0.410	3.14	1.19	1.29

Psh; peso de suelo húmedo; Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.4

Fecha: 19 de junio 2004

Datos obtenidos a las 7 de tarde

No. Cilindro	Peso cilindro (gr)	Psh (gr)	Pss (gr)	Radio (cm)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Reducción Altura (cm)	Valor de Pi	Da inicial (g/cm ³)	Da final (g/cm ³)
47	84.7	140.2	120.9	2.6	5.1	4.80	0.300	3.14	1.12	1.19
147	79.0	148.6	128.7	2.6	5.1	4.95	0.150	3.14	1.19	1.22
287	83.5	160.2	139.6	2.6	5.1	5.00	0.100	3.14	1.29	1.31
303	85.1	157.7	136.3	2.6	5.1	4.89	0.210	3.14	1.26	1.31
146	87.0	158.7	136.8	2.6	5.1	4.88	0.220	3.14	1.26	1.32
138	83.8	160.1	138.9	2.6	5.1	4.99	0.110	3.14	1.28	1.31
143	83.9	142.0	123.0	2.6	5.1	5.07	0.030	3.14	1.14	1.14
44	83.5	148.4	130.2	2.6	5.1	4.80	0.300	3.14	1.20	1.28
310	86.1	140.9	122.6	2.6	5.1	4.76	0.340	3.14	1.13	1.21
319	85.5	160.2	140.1	2.6	5.1	4.97	0.130	3.14	1.29	1.33

Psh; peso de suelo húmedo; Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.5

Fecha: 20 de junio 2004

Datos obtenidos a las 7 de mañana

No.	Peso	Psh	Pss	Radio	Altura	Altura	Reducción	Valor	Da	Da
-----	------	-----	-----	-------	--------	--------	-----------	-------	----	----

Cilindro	cilindro (gr)	(gr)	(gr)	(cm)	inicial (cm)	final (cm)	Altura (cm)	de Pi	inicial (g/cm ³)	final (g/cm ³)
151	79.5	149.2	128.4	2.6	5.1	4.82	0.280	3.14	1.19	1.25
79	87.2	157.7	136.0	2.6	5.1	4.95	0.150	3.14	1.26	1.29
130	84.5	146.3	126.7	2.6	5.1	4.84	0.260	3.14	1.17	1.23
64	85.5	138.8	120.0	2.6	5.1	4.70	0.400	3.14	1.11	1.20
312	83.4	148.1	128.4	2.6	5.1	4.88	0.220	3.14	1.19	1.24
52	83.6	150.4	130.4	2.6	5.1	4.95	0.150	3.14	1.20	1.24
71	87.5	148.0	128.0	2.6	5.1	4.75	0.350	3.14	1.18	1.27
131	87.4	148.5	129.6	2.6	5.1	4.85	0.250	3.14	1.20	1.26
295	87.3	157.8	136.4	2.6	5.1	5.00	0.100	3.14	1.26	1.28
55	82.4	141.6	122.8	2.6	5.1	4.78	0.320	3.14	1.13	1.21

Psh; peso de suelo húmedo; Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.6

Fecha: 20e junio 2004

Datos obtenidos a las 7 de tarde

No. Cilindro	Peso cilindro (gr)	Psh (gr)	Pss (gr)	Radio (cm)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Reducción Altura (cm)	Valor de Pi	Da inicial (g/cm ³)	Da final (g/cm ³)
65	84.3	152.1	130.8	2.6	5.1	4.75	0.350	3.14	1.21	1.30
41	85.9	161.3	139.4	2.6	5.1	4.90	0.200	3.14	1.29	1.34
s/n	77.5	154.8	133.5	2.6	5.1	4.88	0.220	3.14	1.23	1.29
136	83.3	159.4	137.3	2.6	5.1	4.70	0.400	3.14	1.27	1.38
66	84.4	164.1	141.8	2.6	5.1	4.79	0.310	3.14	1.31	1.39
48	83.5	167.5	144.7	2.6	5.1	4.79	0.310	3.14	1.34	1.42
154	84.2	139.8	120.8	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.12	1.24
122	84.6	167.9	144.6	2.6	5.1	4.75	0.350	3.14	1.34	1.43
141	84.7	173.8	147.4	2.6	5.1	4.85	0.250	3.14	1.36	1.43

50	84.4	125.0	107.2	2.6	5.1	4.20	0.900	3.14	0.99	1.20
----	------	-------	-------	-----	-----	------	-------	------	------	------

Psh; peso de suelo húmedo; Pss; peso de suelo seco

Cuadro 1.7

Fecha: 19 de junio 2004

Datos obtenidos a las 7 de mañana

No. Cilindro	Peso cilindro (gr)	Psh (gr)	Pss (gr)	Radio (cm)	Altura inicial (cm)	Altura final (cm)	Reducción Altura (cm)	Valor de Pi	Da inicial (g/cm ³)	Da final (g/cm ³)
156	84.2	136.7	118.0	2.6	5.1	4.68	0.420	3.14	1.08	1.17
44	86.0	151.5	129.7	2.6	5.1	4.70	0.400	3.14	1.06	1.15
138	83.1	150.6	128.9	2.6	5.1	4.65	0.450	3.14	1.14	1.25
147	80.4	145.8	125.9	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.20	1.33
310	86.8	145.8	125.4	2.6	5.1	4.70	0.400	3.14	1.09	1.18
314	83.3	137.0	118.0	2.6	5.1	4.65	0.450	3.14	1.06	1.16
143	87.1	144.3	123.6	2.6	5.1	4.78	0.320	3.14	1.15	1.22
287	85.0	139.4	120.3	2.6	5.1	4.70	0.400	3.14	1.07	1.16
47	83.6	142.6	122.4	2.6	5.1	4.60	0.500	3.14	1.08	1.20
63	85.5	148.5	131.4	2.6	5.1	4.53	0.570	3.14	1.11	1.25

Psh; peso de suelo húmedo; Pss; peso de suelo seco